



**UNIVERSIDADE DO MINHO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR**

**CURSO DE LICENCIATURA EM
ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO
ANO LETIVO 2018/2019 – 4º ANO

**Tema: Projeto de Reabilitação do Antigo Parque Eólico
da Zona de Ribeira de Vinha**

Autor: Luís Miguel Da Cruz dos Santos Brito, Nº 3861

Orientador: Eng.º Nelson Silveira da Graça

Mindelo, 2019

**UNIVERSIDADE DO MINDELO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR
CURSO DE LICENCIATURA EM
ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**Projeto de Reabilitação do Antigo Parque
Eólico da Zona de Ribeira de Vinha**

Trabalho de Conclusão do Curso

Ano Letivo 2018/2019- 4º Ano

Autor: Luís Miguel da Cruz dos Santos Brito, N.º 3861

Orientador: Nelson Silveira da Graça

Coordenação: Manuel Pinheiro

Mindelo, 2019

Luís Miguel da Cruz dos Santos Brito

**Projeto de Reabilitação do Antigo Parque Eólico da
Zona de Ribeira de Vinha**

Assinatura do Autor

Trabalho apresentado à
Universidade do Mindelo como
parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Licenciado em
Engenharia em Energias
Renováveis.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais, minha avó e minhas madrinhas, por serem os pilares do alcance de mais uma vitória no meu percurso académico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador Eng.º Nelson Silveira da Graça pela disponibilidade e orientação disponibilizadas para que este trabalho se realizasse.

Ao Eng.º Rui Paisana pelo apoio na escolha do tema e também pelas informações fornecidas.

Aos meus colegas do curso, que fomos companheiros durante este período de quatro anos.

A todos que de alguma forma colaboraram para o alcance desse objetivo.

Agradeço por fim à Universidade do Mindelo em geral, a todos os docentes e funcionários que contribuíram para a conclusão desta etapa fundamental.

“ Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem ‘Por quê?’ Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Porque não?’ ”

-George Bernard Shaw

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso contempla a Reabilitação do Parque Eólico da Ribeira de Vinha gerando uma renovação quase que completa em comparação com o atualmente existente (que se encontra em estado de degradação), através da aquisição e transporte de novos equipamentos de maior porte com diferentes sistemas de controlo, fazendo a construção de novas fundações e acessos, efetuando a ligação à rede elétrica e estabelecendo novas tarifas de energia para o seu funcionamento.

O sistema proposto consiste em apoiar as centrais da concessionária ELECTRA Norte de forma sustentável, aproveitando uma considerável disponibilidade do recurso eólico no local, reabilitando em três fases o Parque da Ribeira de Vinha. Após a instalação da primeira fase do projeto, as outras duas fases serão efetuadas consoante o crescimento da demanda de energia para a Ilha de São Vicente.

Para efetuar a fundamentação do trabalho foram utilizadas pesquisas bibliográficas, visitas de campo, entrevistas exploratórias além de estudo de caso.

No final do trabalho, foi realizado o dimensionamento do sistema, e da informação obtida, concluiu-se que as hipóteses de pesquisa foram validadas e que os resultados foram satisfatórios.

Palavras-Chave: Reabilitação, Parque Eólico, Sustentável, Recurso Eólico, Demanda de Energia.

ABSTRACT

The present work of completion of course includes the Rehabilitation of the Wind Farm of Ribeira de Vinha, generating an almost complete renovation in comparison with the existing one (that is in a state of degradation), through the acquisition and transportation of new equipment of larger size with different control systems, building new foundations and accesses, making the connection to the electrical network, and establishing new energy tariffs for its operation.

The proposed system consists of supporting the power stations of the ELECTRA Norte concessionaire in a sustainable manner, taking advantage of a considerable availability of the local wind resource, rehabilitating the Ribeira de Vinha Park in three phases. After the installation of the first phase of the project, the other two phases will be carried out according to the growth of energy demand for the Island of São Vicente.

In order to make the foundation of the work, bibliographical research, field visits, exploratory interviews and case study were used.

At the end of the work, the sizing of the system was performed, and the information obtained, it was concluded that the research hypotheses were validated and that the results were satisfactory.

Key-Words: Rehabilitation, Wind Farm, Sustainable, Wind Resource, Energy Demand.

ÍNDICE

RESUMO	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABELAS	15
ÍNDICE DE QUADROS	16
SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	17
I-INTRODUÇÃO	18
1.1-Justificativa	19
1.2-Objetivos	19
1.2.1- Objetivo Geral	19
1.2.2- Objetivos Específicos	19
1.3-Hipótese de Pesquisa	20
1.4- Abordagem Metodológica	20
1.5- Estrutura do Trabalho	21
II- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1- A importância da Energia Renovável	22
2.2- Energias Renováveis em Cabo Verde	23
2.3- Setor Energético de Cabo Verde	25
2.4- O Recurso Eólico	26
2.4.1- Mecanismos de Geração do Vento	27
2.4.2- Variação da Velocidade do Vento	29
2.5- Representação Espectral do Vento	33
2.6- Cálculos Energéticos	34
2.6.1- Energia e Potência Extraídas do Vento	34

2.6.2- Forças atuantes em uma pá do aerogerador.....	38
2.6.3- Energia elétrica produtível anualmente.....	40
2.7- Sistemas de Aproveitamento da Energia Eólica	40
2.7.1- VAWT.....	42
2.7.2- HAWT	44
2.8- Composição de um Aerogerador de Eixo Horizontal	45
2.8.1- Nacelle.....	46
2.8.2- Rotor.....	49
2.8.3- Torre.....	51
2.8.4- Pás, Cubo e Eixo.....	52
2.8.5- Transmissão e Caixa Multiplicadora	53
2.8.6- Gerador.....	54
2.9- Mecanismos de Controlo	55
2.9.1- Controle de Passo (Controlo Pitch)	55
2.9.2- Controle Estol (Controlo Stall).....	57
2.9.3- Controlo YAW	58
2.10- Sistema Elétrico de um Aerogerador.....	59
2.10.1- Aerogeradores com Velocidade Constante	59
2.10.2- Aerogeradores com Velocidade Variável	60
2.11- Aplicações dos Sistemas Eólicos	61
2.11.1- Sistemas Isolados.....	62
2.11.2- Sistemas Híbridos	63
2.11.3- Sistemas Interligados à Rede.....	64
2.11.4- Sistemas Offshore	64
III- DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	65
3.1- Localização do Parque.....	65

3.2- Historial do Parque da Ribeira de Vinha	66
3.2.1- Ficha Técnica do Antigo Projeto	66
3.2.3- Características do Equipamento	66
3.2.5- Caracterização do Investimento.....	69
3.3- Dimensionamento do Projeto de Reabilitação	70
3.3.1- Enquadramento do Projeto no Panorama energético da Ilha	71
3.3.2- Ficha Técnica do Aerogerador a ser instalado	72
3.4- Custo do Projeto de Reabilitação do Parque.....	74
3.4.1- 1ª Fase (330 kW)	74
3.4.2- 2ª Fase (660 kW)	75
3.4.3- 3ª Fase (990 kW)	76
3.5- Viabilidade Económica Do Projeto da Reabilitação	77
3.5.1- 1ª Fase (330 kW)	77
3.5.2- 2ª Fase (660 kW)	78
3.5.3- 3ª Fase (990 kW)	78
3.6- Poupança de Combustíveis Fósseis após implementação do Projeto	80
3.6.1- 1ª Fase (330 kW)	80
3.6.2- 2ª Fase (660kW)	80
3.6.3- 3ª Fase (990kW)	81
3.7- Poupança em Termos Monetários para os Cofres do Estado.....	82
3.7.1- 1ª Fase (330 kW)	82
3.7.2- 2ª Fase (660 kW)	82
3.7.3- 3ª Fase (990 kW)	83
3.8- Impactes Ambientais do Projeto da Reabilitação.....	84
IV- CONCLUSÃO.....	85
4.1- Considerações Finais	85

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- A localização dos parques eólicos e suas respectivas capacidades instaladas ..	24
Figura 2- Evolução da procura e a previsão para 2020.....	26
Figura 3- Modelo conceitual da circulação global atmosférica.....	27
Figura 4- Efeitos de pequena escala na circulação atmosférica junto à orla costeira	28
Figura 5- Uma Variação do vento em 2 Minutos	29
Figura 6- Qualquer Edifício se torna num obstáculo ao vento.....	32
Figura 7- Perfis do Vento passando por uma colina	32
Figura 8- Densidade espectral de energia	33
Figura 9- Fluxo de ar através de uma área transversal A	34
Figura 10- Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás	35
Figura 11- Distribuição de C_p em função de V_3/V_1	37
Figura 12- Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador	38
Figura 13- Característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas	39
Figura 14- Tipos de rotores de eixo vertical.....	42
Figura 15- Aerogerador de Rotor tipo Darrieus	43
Figura 16- Aerogerador de Rotor tipo Savonius	43
Figura 17- Aerogerador de Rotor Tipo H.....	44
Figura 18- N° de Pás de diferentes Aerogeradores de Eixo Horizontal	45
Figura 19- Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	46
Figura 20- Vista do interior da Nacelle.....	46
Figura 21- Vista do interior da nacelle de um Aerogerador.....	48
Figura 22- Rotor de um Aerogerador de 3 Pás com raio R.....	50
Figura 23- Torre Tubular.....	51
Figura 24- Torre Entrelaçada.....	51
Figura 25- Detalhe de um cubo para conexão de pás	52
Figura 26- Gerador conectado a caixa de engrenagens.....	53
Figura 27- Gerador convencional	54
Figura 28- Fluxo aderente ao perfil	55
Figura 29- Curva de Potência de um Aerogerador com Controlo de Passo.....	56
Figura 30- Fluxo separado (estol) em volta do perfil	57
Figura 31- Curva de potência típica de um aerogerador com controlo tipo Stall.....	58

Figura 32-Um dos oito motores de engrenagem de guinada de um Vestas V-82	58
Figura 33- Rotação das engrenagens em forma de coroa	58
Figura 34- Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante	59
Figura 35- Esquema elétrico de um gerador com velocidade	61
Figura 36-Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e principais aplicações..	61
Figura 37-Configuração de um sistema eólico isolado	62
Figura 38-Configuração de um sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel	63
Figura 39- Parque eólico conectado à rede	64
Figura 40- Parque Eólico Offshore	64
Figura 41- Localização da Zona da Ribeira de Vinha	65
Figura 42- Parque Eólico no Monte Ribeira de Julião	65
Figura 43- Legenda dos componentes dos Aerogeradores Aeroman	68
Figura 44- Produção Anual Do Aerogerador Aeroman	68
Figura 45- Curva de Potência do Aerogerador Aeroman	68
Figura 46- Curva de Potência do Aerogerador Enercon E-33	73
Figura 47- Dimensionamento da 1ª Fase do Projeto	74
Figura 48- Dimensionamento da 2ª Fase do Projeto	75
Figura 49- Dimensionamento da 3ª Fase do Projeto	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Localização e capacidade instalada em 2018, em de Cabo Verde.....	24
Tabela 2-Matriz elétrica de Cabo Verde para o ano 2015.....	25
Tabela 3- Valores típicos de Z0.....	31
Tabela 4- Repartição de Potência da ELECTRA Norte.....	70
Tabela 5- Previsão do Crescimento da Carga para São Vicente	71
Tabela 6- Velocidade Média Anual para a Zona de Ribeira de Vinha	73
Tabela 7-Tarifas de Energia do Projeto	77
Tabela 8-Produção Anual da 1ª Fase do Projeto	77
Tabela 9-Produção Anual da 2ª Fase do Projeto	78
Tabela 10- Produção Anual da 3ª Fase do Projeto	78

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Legenda dos Componentes da Nacelle de um Aerogerador Convencional... 47

Quadro 2- Legenda dos componentes de um Aerogerador com gerador multipólos 49

SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AIA	Avaliação de Impacte Ambiental
ARE	Agência de Regulação Económica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
cSt	Centistoke
GEE	Gases do Efeito de Estufa
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt Hora
m	Metro
MW	Megawatt
m/s	Metros por segundo
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ODM	Objetivos do Desenvolvimento do Milénio
PERCV	Plano Energético Renovável de Cabo Verde
VAWT	Vertical Axis Wind Turbines
W/m²	Watts por metro quadrado
ZDER	Zona de Desenvolvimento das Energias Renováveis
ρ	Massa específica do ar

I-INTRODUÇÃO

No princípio do segundo milénio, fontes energéticas como o vento, a água e a lenha dominavam a produção de calor e de força motriz. Em épocas mais recentes, as novas fontes – o carvão, o petróleo, o gás e o nuclear – substituíram estas fontes tradicionais, em particular nos países que se foram industrializando. O ressurgimento das energias renováveis dá-se a partir dos choques petrolíferos da década de 70. Por um lado, a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia e, por outro lado, a obrigação de proteger o ambiente cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis (CASTRO, 2004).

Toda atividade humana precisa de Energia para que possa ser realizada. Qualquer movimento só é possível se existir energia mecânica disponível. Em função desta necessidade muito cedo na história do desenvolvimento humano a conversão de formas de energia primária em energia Mecânica para a realização de trabalhos motivou o ser humano a estudar e desenvolver técnicas de conversão de energia. Uma das formas de energia primária abundante na natureza é a Energia dos Ventos, denominada energia Eólica. A conversão da energia dos ventos em energia mecânica consiste numa técnica relativamente simples, bastando apenas que se tenha um potencial eólico disponível e que resista aos caprichos da natureza (CARISON, 2014).

O presente trabalho de conclusão do curso tem como tema “**Projeto de Reabilitação do Antigo Parque Eólico da Zona de Ribeira de Vinha**”, tendo como foco principal a reunião de dados com o intuito de responder ao seguinte problema de pesquisa:

- De que forma, a matriz energética da Ilha de São Vicente será beneficiada com reabilitação do antigo parque eólico da zona de Ribeira de Vinha?

A reabilitação do parque reúne condições favoráveis à uma produção de forma limpa e sustentável, aproveitando um recurso abundante e característico da sua localização.

1.1-Justificativa

A escolha do tema baseia-se principalmente na ambição do autor em querer cada vez mais uma produção limpa e descentralizada das centrais termoelétricas da concessionária de energia presentes na ilha, inserindo assim uma fonte ambientalmente sustentável na matriz energética da mesma.

Outra motivação do autor baseia-se num desejo já duradouro em ver o parque de novo em funcionamento devido ao seu estatuto de pioneiro da energia eólica na Ilha de São Vicente, localizado numa área que pode ser considerada um hotspot de energia eólica vantajosa para aerogeradores.

O projeto servirá a sociedade em geral visto que diminuirá as horas de funcionamento dos grupos geradores, consumidores de combustíveis fósseis que representam um grande peso aos cofres do Estado e que libertam GEE para a atmosfera contribuindo para o aquecimento global do planeta e, este mesmo projeto poderá também contribuir para uma possível redução das tarifas de eletricidade.

1.2-Objetivos

1.2.1- Objetivo Geral

- Elaborar um projeto de restauração e reativação do Parque Eólico da Ribeira de Vinha, com o intuito de reforçar a matriz energética da Ilha de São Vicente.

1.2.2- Objetivos Específicos

- Explorar a literatura relacionada com o tema.
- Compilar informações fundamentais para o avanço do projeto.
- Contribuir para diminuição de emissão de GEE.
- Contribuir para a diminuição das tarifas domésticas.
- Dimensionar o projeto eólico através de cálculos.
- Efetuar o estudo de viabilidade financeira do Projeto.
- Apurar impactes do Projeto.
- Esboçar as considerações Finais.

1.3-Hipótese de Pesquisa

De acordo com os objetivos foram definidas as seguintes hipóteses:

Hipótese 1: A substituição dos antigos aerogeradores de duas pás por equipamentos de três pás, garantindo um maior aproveitamento do recurso eólico disponível durante praticamente todo o ano.

Hipótese 2: A reativação do parque, associado a concessionária, contribuirá para o aumento da potência disponível na Ilha de São Vicente, ajudando a superar as necessidades dos diferentes tipos de consumidores (BT e MT)

Hipótese 3: A reinserção do parque fará com que a concessionária poupe em termos de consumo de combustíveis fósseis, mais concretamente o Fuel, consumido pelos Grupos Geradores de Energia Elétrica.

Hipótese 4: A aposta na reconstrução e reativação do Parque Eólico da Ribeira de Vinha terá um forte impacto na política de sustentabilidade energética, na economia do país, na sociedade e no melhoramento da qualidade ambiental.

1.4- Abordagem Metodológica

Numa fase inicial deste projeto, começou-se pelo método da pesquisa bibliográfica em livros, publicações, artigos científicos e também na internet, constituindo a base teórica fundamental para o avanço deste projeto, prosseguida de um processo de triagem das informações que mais se enquadravam no contexto do trabalho.

Essa recolha de dados e informações foi ainda apoiada por instituições, por conversas e diretrizes de profissionais da área, pessoas com experiência neste ramo como também noutras áreas aqui incluídas.

O dimensionamento do projeto foi a fase em que as informações recolhidas se interligaram, através de cálculos mas também de Software, respeitando todos os parâmetros necessários para o bom funcionamento do parque Eólico.

Em seguida fez-se as considerações finais abordando questões importantes como a viabilidade do Parque e os seus impactos.

1.5- Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos organizados em sequência lógica e objetiva.

O **Capítulo I** representa a parte pré-textual do trabalho, onde é feita a apresentação, contextualização e descrição do tema em questão. Ainda neste capítulo são expostos, a justificativa da escolha do tema, os objetivos geral e específicos, as hipóteses de pesquisa, a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

O **Capítulo II** apresenta a Fundamentação Teórica de todos os assuntos a serem retratados ao longo do trabalho fruto de uma seleção entre as pesquisas bibliográficas realizadas, reunindo assim um conjunto de informações que constituem a base do projeto.

O **Capítulo III** é a fase do desenvolvimento do projeto onde estão presentes as informações mais pertinentes do trabalho. Neste terceiro capítulo estão presentes tópicos fundamentais tais como o dimensionamento do projeto, os custos a ele associados, a viabilidade econômica do mesmo, as economias em termos monetários e também em termos de consumo de combustíveis e por fim os possíveis impactos do projeto sobre o Ambiente.

O **Capítulo IV** refere-se a análise e comentários finais sobre os resultados obtidos durante a elaboração do trabalho com o propósito de validar as hipóteses anteriormente mencionadas.

II- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1- A importância da Energia Renovável

De acordo com Hemami (2012) a terra contém inúmeras belezas em sua natureza, desde plantas, flores, árvores, pássaros e assim por diante, até chegar a maravilhas subaquáticas. Apesar da abundância de suas maravilhas, nenhum de seus conteúdos pode ser ilimitado, excetuando a luz e a energia do sol, que vêm de fora, de resto tudo pertence a própria Terra. Se não tomarmos cuidado para usar recursos sabiamente e manter o equilíbrio, todas as maravilhas da Terra chegarão ao fim. É nossa responsabilidade, como os habitantes deste planeta, mantê-lo limpo e em forma. Nos tempos antigos, quando o número de pessoas era pequeno e eles não se moviam tanto, a poluição era limitada e a queima de madeira e carvão não levava a mudanças perceptíveis. Apesar desse fator, as florestas nas áreas povoadas gradualmente desapareceram e hoje mais florestas são destruídas a cada ano. Adicionado a isso, a poluição da queima de carvão, petróleo e gás para aquecimento, transporte e fabricação está lentamente destruindo o meio ambiente, tornando o ar e a água sujos, elevando a temperatura do planeta, e perturbando a nossa saúde. Temos que trabalhar com a natureza para manter o equilíbrio. É responsabilidade de todos cuidar do meio ambiente e minimizar a poluição. É de todo mundo a responsabilidade de cuidar do meio ambiente e minimizar a poluição. A energia pode vir de carvão, petróleo e outras fontes. Mas também temos uma abundância de vento, luz do sol e outras fontes naturais de energia que não resultam em poluição. A importância das energias renováveis é óbvia. É limpa, está em consonância com a natureza, e vem da natureza sem a poluir. Além disso, as energias renováveis, como a energia eólica e solar, são abundantes e gratuitas. É uma escolha sábia usá-las.

As fontes renováveis de energia desempenham um papel importante, visto que, podem contribuir para a produção de energia elétrica que de outro modo seria eventualmente produzida usando fontes de energia baseadas em recursos fósseis, fonte de emissões antropogênicas de gases de efeito de estufa para a atmosfera (BATISTA, 2013)

2.2- Energias Renováveis em Cabo Verde

De acordo com Monteiro (2018), com vista a encontrar soluções para o desenvolvimento sustentável do país foi elaborado o PERCV¹ cujo principal objetivo é identificar e reservar as áreas com potencial para o desenvolvimento de projetos na área das energias renováveis. Dentro das políticas do setor energético, foram definidas as ZDER, zonas destinadas a acolher projetos de aproveitamento das energias renováveis nas seguintes áreas: solar, eólica, hídrica, geotérmica, resíduos sólidos urbanos e marítima (Lopes, 2002 *apud* Monteiro, 2018). Os recursos renováveis, eólico e solar fotovoltaico, são aqueles que mais abundam em Cabo Verde, e, atualmente representam a totalidade do aproveitamento renovável para a produção da energia elétrica do país. A eólica representa a maior fatia com 90% e o solar fotovoltaico com os restantes 10%. Dada a sua localização espacial, Cabo Verde encontra-se sobre influência dos ventos alísios, ventos bastante constantes provenientes de uma única direção, nordeste (NE), sendo esta característica fundamental do recurso eólico desta região que o torna num aproveitamento renovável bastante benéfico para o abastecimento elétrico do país (Irena, 2016 *apud* Monteiro, 2018). A ELECTRA. SARL (empresa de eletricidade e água), em 1994, procedeu à instalação de três parques eólicos no arquipélago de Cabo Verde. Um parque na ilha do Sal com duas turbinas eólicas com uma potência de 300 kW cada e, outros dois parques nas ilhas de S. Vicente e Santiago com três turbinas eólicas, cada uma com 300 kW de potência. Estes parques são compostos por aerogeradores do fabricante Nordtank com regulação por passo fixo - “Stall”. Nos finais de 2011, a Vestas assinou um contrato para o fornecimento de geradores eólicos que totalizaram uma capacidade de 25,5 MW para Cabo Verde, especificamente para o projeto desenvolvido pelo promotor Cabeólica, que incluiu a construção de quatro parques eólicos nas ilhas de Santiago, Sal, São Vicente e Boavista. A Vestas instalou um total de trinta aerogeradores de 850 kW de potência unitária (11, 9, 7 e 3 unidades nas ilhas de Santiago, Sal, São Vicente e Boavista, respetivamente) numa parceria público/privada entre o governo de Cabo Verde e a ELECTRA. Desta forma, atualmente, Cabo Verde conta com uma capacidade instalada de eólica de 30,6 MW, espacialmente distribuída por quatro ilhas. Os aerogeradores instalados nos parques eólicos são do fabricante Vestas, do tipo V52 850 kW.

¹ Elaborado pela Direção Geral de Energia de cinco em cinco anos.

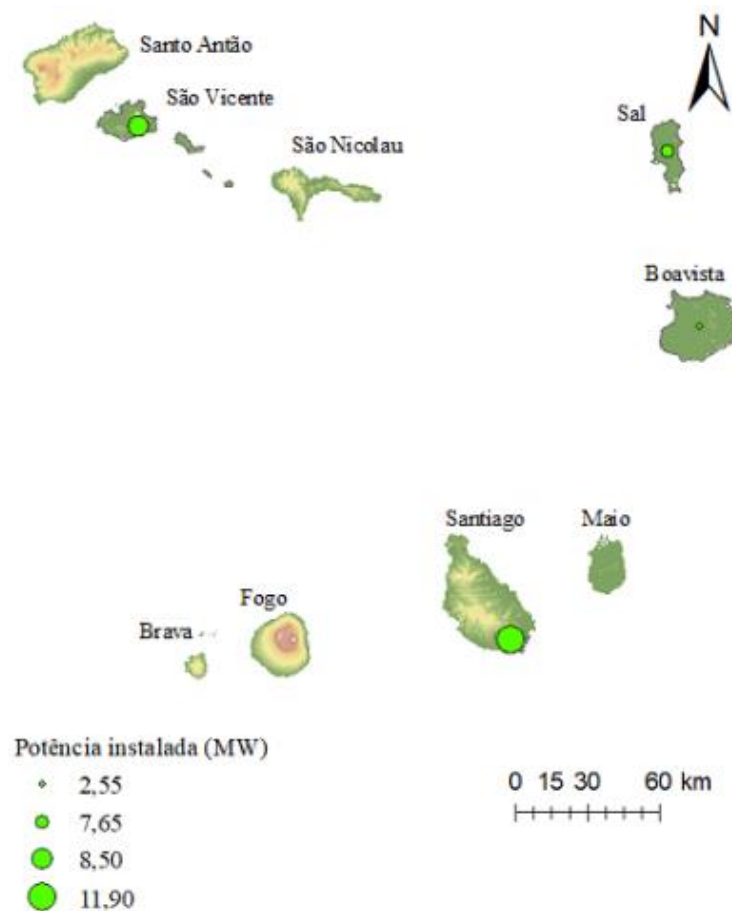


Figura 1- A localização dos parques eólicos e as suas respetivas capacidades instaladas (Fonte: Monteiro, 2018)

As localizações exatas dos referidos parques eólicos encontram-se apresentadas na seguinte tabela:

	Ilha	Localização do parque eólico		Capacidade instalada (MW)
		Latitude	Longitude	
Parques eólicos	Santiago	14° 58'09,55"	23° 30'39,02"	11,90
	São Vicente	16° 50'02,17"	25° 01'14,31"	8,50
	Sal	16° 42'26,46"	22° 54'17,14"	7,65
	Boavista	16° 12'45,57"	22° 54'23,57"	2,55

Tabela 1- Localização e capacidade instalada em 2018, em MW, dos parques eólicos em operação no arquipélago de Cabo Verde.

2.3- Setor Energético de Cabo Verde

De acordo com Monteiro (2018), atualmente, a energia elétrica em Cabo Verde é gerada a partir de três fontes de energia: solar fotovoltaica, eólica e geradores a Diesel e Fuelóleo (cuja respetiva produção por ilha é apresentada na Tabela 2). Cabo Verde como um país de nível de desenvolvimento médio, depende fortemente da importação de combustíveis fósseis, representando 79% da energia elétrica consumida no país no ano de 2015, que, para além de ser poluente, é cara e sensível às flutuações dos preços de mercado. Uma das estratégias do governo passa por reduzir a dependência dessas importações através da aposta nas energias renováveis, sendo que, esta aposta tem um forte impacto na política de sustentabilidade energética, na economia do país, na sociedade e no melhoramento da qualidade ambiental. A inexistência de transporte de eletricidade entre as ilhas impossibilita a gestão dos sistemas elétricos de energia como um único sistema, obrigando a que, em cada ilha os sistemas elétricos de energia funcionem isolados, fazendo com que existam instalados em cada ilha sistemas de armazenamento de combustíveis. Estes sistemas de pequena dimensão são um dos fatores que tem conduzido a problemas de instabilidade no fornecimento de eletricidade, sendo mesmo comum a existência de cortes de energia elétrica nas ilhas.

Fonte	Ilhas	Produção (MWh)	% por ilha	% total
Térmica (gasóleo, fuelóleo)	Santo Antão	11 712	3,11	79,47
	São Vicente	52 077	13,81	
	São Nicolau	5 964	1,58	
	Sal	35 936	9,53	
	Maio	2 626	0,70	
	Santiago	176 547	46,82	
	Fogo	12 260	3,25	
	Brava	2 575	0,68	
Eólica	Santo Antão	1 687	0,45	18,88
	São Vicente	19 045	5,05	
	Sal	18 776	4,98	
	Santiago	31 700	8,41	
Solar Fotovoltaica	Sal	2 173	0,58	1,65
	Santiago	4 034	1,07	

Tabela 2-Matriz elétrica de Cabo Verde para o ano 2015 (Fonte: Monteiro, 2018)

O arquipélago de Cabo Verde encontra-se numa fase de desenvolvimento, marcada por importantes mudanças na sua estrutura económica, com relevância para as perspetivas do forte crescimento do sector terciário, com especial ênfase para o sector doméstico, turismo e comercial/industrial/agrícola (Figura 2), bem como pelos investimentos públicos realizados em infraestruturas e equipamentos, que procuram reforçar a integração e coesão do território nacional (Monteiro, 2018).

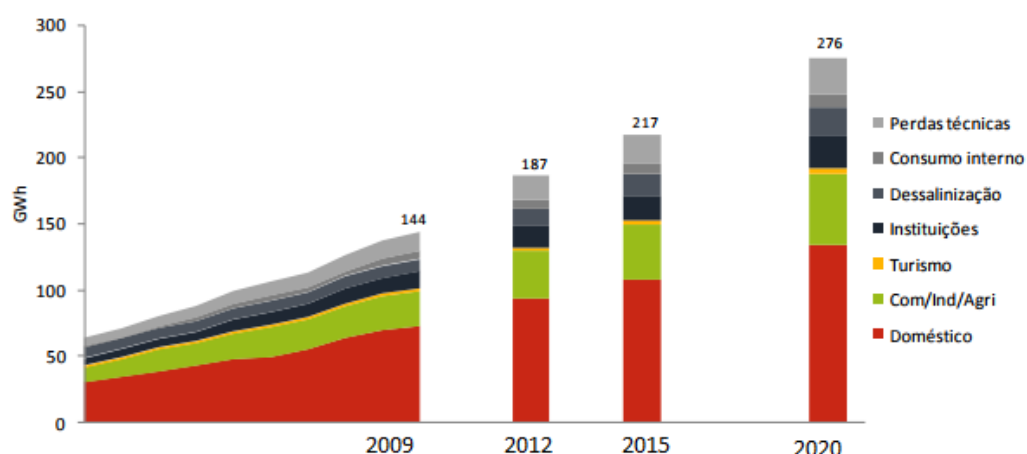


Figura 2- Evolução da procura e a previsão para 2020 (Fonte: Monteiro, 2018)

2.4- O Recurso Eólico

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspetos, entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo (DUTRA, 2008).

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devidas ao facto de a radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. Os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem em bandas situadas a cerca de 10 km da superfície da terra. Como não é possível colocar os conversores eólicos nessas zonas, o espaço de interesse encontra-se limitado a algumas dezenas de metros na atmosfera (CASTRO, 2004).

2.4.1- Mecanismos de Geração do Vento

Dutra (2008) afirma que, a energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser relacionada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em:

- **Alísios:** ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- **Contra-Alísios:** ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- **Ventos do Oeste:** ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- **Polares:** ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

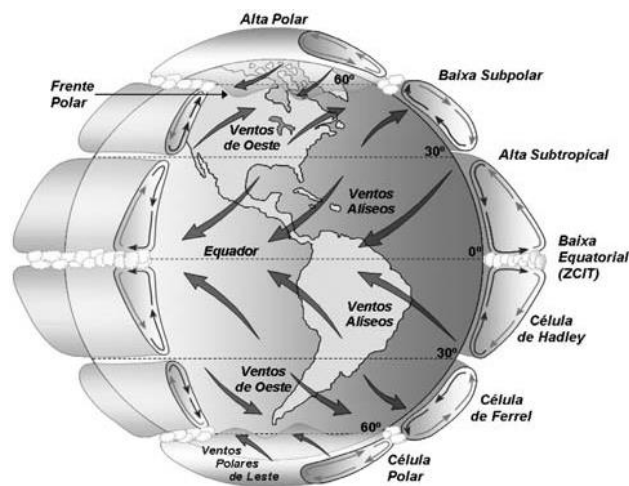


Figura 3- Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos à superfície. Também são indicadas as latitudes típicas de baixas e altas pressões (Fonte: Martins et al, 2007)

Dutra (2008) afirma que, tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de 23,5° em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes), surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno. Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima, encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida, e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

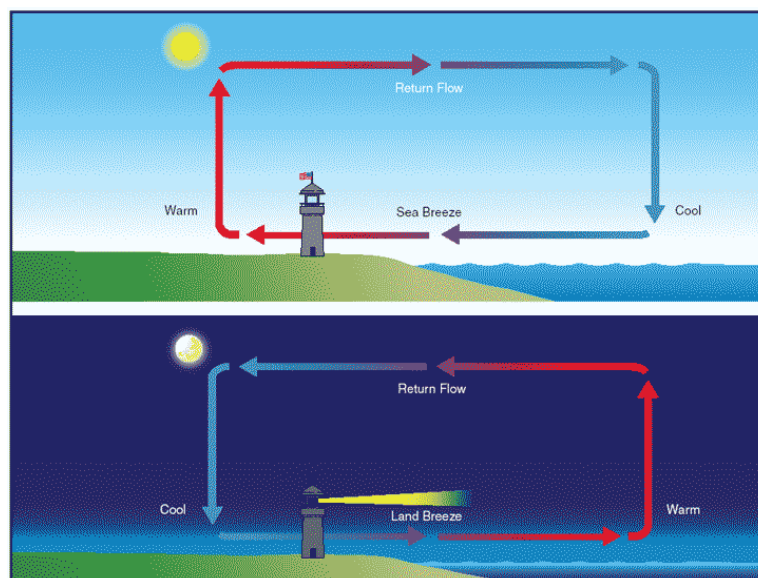


Figura 4- Efeitos de pequena escala na circulação atmosférica junto à orla costeira (Fonte: Marçal, 2012)

2.4.2- Variação da Velocidade do Vento

Segundo HEMAMI (2012) nós aprendemos que a velocidade do vento é o fator mais influente para quanta potência que uma turbina eólica pode gerar. De facto, para qualquer projeto de energia eólica a velocidade do vento é o primeiro fator de decisão. A natureza do vento é que é variável. Isso implica que sua direção, velocidade e temperatura podem mudar. Esta mudança pode ser de minuto a minuto ou às vezes de segundo a segundo. Assim, é interessante e necessário investigar a variação da velocidade do vento. Existem quatro categorias de variação de velocidade do vento. Esses são:

- Variação da velocidade do vento com o tempo
- Variação da velocidade do vento com altura
- Variação da velocidade do vento com o terreno
- Variação da velocidade do vento com a zona geográfica

2.4.2.1- Variação da velocidade do vento com o tempo

De acordo com Hemami (2012) a variação da velocidade do vento com o tempo, por si só, se divide em três categorias: mudanças momentâneas, mudanças diárias e mudanças sazonais. O vento é gerado por uma diferença na temperatura do ar entre dois locais. Então, está sujeito ao calor da luz do sol e à temperatura dos arredores em uma área da Terra. Às vezes, podemos ver claramente essa variação de vento e observar que o vento não sopra com uma velocidade constante. Esta variação momentânea pode ser vista claramente quando a velocidade do vento é registrada.

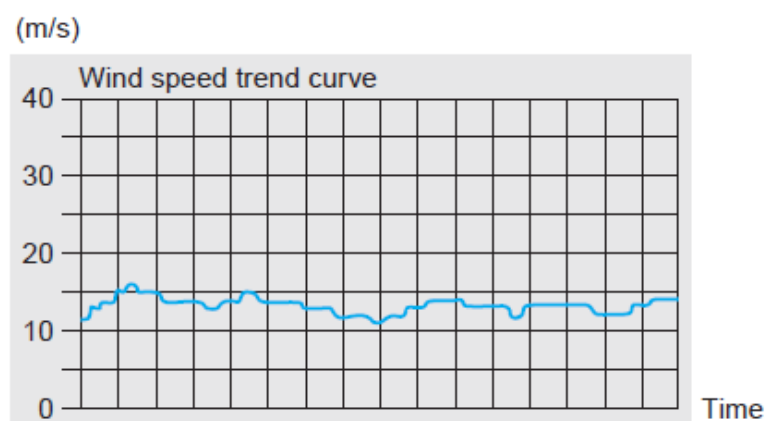


Figura 5- Uma Variação do vento em 2 Minutos (Fonte: Hemami, 2012)

Para Hemami (2012), na figura 5 cada divisão no eixo horizontal representa 8 seg. Os números no eixo vertical estão em metros por segundo. Os valores estão ao redor 10 m/seg. A figura mostra a variação da velocidade do vento em um intervalo de tempo de 2 min. As mudanças diárias de velocidade do vento, como o nome indica, é a variação de velocidade do vento em 24 horas. Por exemplo, em uma região a maior velocidade do vento pode ocorrer em uma determinada hora do dia, e em outras horas há menos vento ou mesmo sem vento. Em outras palavras, podemos ser capazes de identificar um padrão específico para o vento em uma região para vários momentos do dia. Note que isso também pode ser verdade para a direção do vento. A mudança sazonal no vento refere-se à variação do vento durante um ano. Mais uma vez, para este caso, pode-se encontrar um padrão específico para a velocidade dos meses do ano. O melhor exemplo é que em muitas regiões temos mais vento na primavera ou no inverno em relação ao verão. Esta informação deve ser encontrada a partir de dados estatísticos da história do vento, chamados dados de vento. Esta informação mostra, também, que não se pode esperar a mesma produção de energia de uma turbina em diferentes épocas em um ano.

2.4.2.2-Variação da velocidade do vento com altura (Lei de Prandtl²)

Segundo Castro (2004), o atrito entre a superfície terrestre e o vento tem como consequência um retardamento deste último. As camadas mais baixas de ar retardam as que lhe estão por cima, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura ao solo. O efeito da força de atrito vai-se desvanecendo até praticamente se anular a uma altura de aproximadamente 2000 metros.

De acordo com o autor acima citado, no solo, a condição fronteira obriga a que a velocidade do escoamento seja nula. A esta zona da atmosfera caracterizada pela variação da velocidade do vento com a altura chama-se camada limite atmosférica; acima desta zona diz-se que a atmosfera é livre. A região da camada limite atmosférica que se estende até uma altura de cerca de 100 metros – a chamada camada superficial – é a zona de interesse para as turbinas eólicas. Nesta zona, a topografia do terreno e a rugosidade do solo condicionam fortemente o perfil de velocidades do vento, que pode ser adequadamente representado pela lei logarítmica de Prandtl:

² Ludwig Prandtl foi um físico alemão, pioneiro no desenvolvimento de análises Matemáticas que vieram a formar a base da ciência aplicada da engenharia aeronáutica.

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{Z}{z_0}\right) \quad (1)$$

em que $\bar{u}(z)$ é a velocidade média do vento à altura z , u^* é a chamada velocidade de atrito, k é a constante de Von Karman (cujo valor é 0,4), e z_0 é o que se define por comprimento característico da rugosidade do solo. A velocidade de atrito, que varia com a rugosidade do solo, com a velocidade do vento e com forças que se desenvolvem na atmosfera, é difícil de calcular. Para obviar a esta dificuldade, e porque o uso habitual da equação 1 é a extrapolação para alturas diferentes de dados medidos a uma altura de referência, usa-se, na prática, a equação 2:

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(Z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{Z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{z_0}\right)} \quad (2)$$

em que $\bar{u}(Z_R)$ é a velocidade média à altura de referência Z_R . A Tabela 3 mostra valores típicos para o comprimento característico da rugosidade do solo – z_0 .

Tipo de terreno	z_0 (m) min.	z_0 (m) Max.
Lama / gelo	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$
Mar calmo	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Areia	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Neve	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-3}$
Campo de cereais	10^{-3}	10^{-2}
Relva baixa / estepes	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-2}$
Descampados	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Relva alta	$4 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Terreno com árvores	10^{-1}	$3 \cdot 10^{-1}$
Floresta	10^{-1}	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Tabela 3- Valores típicos de Z_0 (Fonte: Hassan, 1990)

2.4.2.3- Variação da velocidade do vento com o terreno

Quando o vento sopra, sua direção e velocidade são influenciadas por todas as obstruções que estão no seu caminho. Em uma altura suficientemente afastada da superfície do solo, direção do vento e velocidade não são perturbados e há um vento mais constante. Todos os obstáculos para o fluxo de vento podem atrasá-lo. Assim, dentro das cidades onde existem muitos edifícios, há mais obstáculos para desacelerar vento. Pelo contrário, em terras agrícolas com vegetações curtas ou ao longo da superfície de um lago não há muita obstrução para desacelerar o vento.

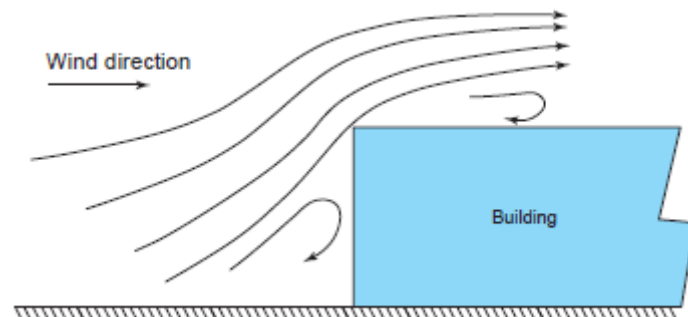


Figura 6- Qualquer Edifício se torna num obstáculo ao vento; o efeito retarda o vento (Fonte: Hemami, 2012)

O efeito de um edifício no fluxo do vento é mostrado na Figura 6. Nota que toda a velocidade do vento cai devido a edifícios ou outras obstruções, mas localmente, a velocidade do vento é maior no teto, já que mais ar deve se mover de uma área mais estreita. Isso é mostrado pelas linhas de perfil mais próximas de cada outro acima do telhado. O cenário na escala maior de uma colina é mostrado na Figura 7. Depois do vento bater na colina à esquerda, passa a colina e acelera no lado direito. Em tal situação, o lado direito da colina é o melhor lugar para instalar turbinas eólicas.

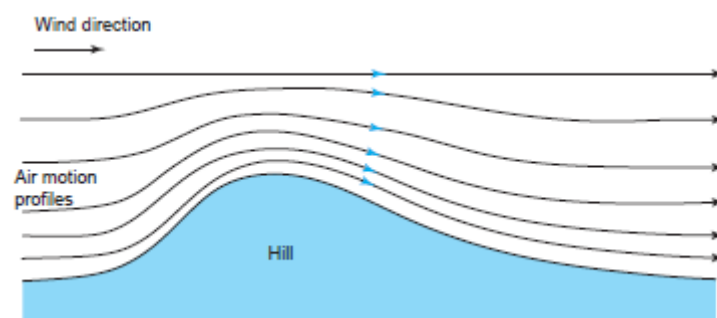


Figura 7- Perfis do Vento passando por uma colina (Fonte: Hemami, 2012)

2.4.2.4- Variação da velocidade do vento com a zona geográfica

Segundo Hemami (2012), a observação mais óbvia que alguém pode fazer é que o clima não é o mesmo em toda parte. A formação do vento é afetada pela mudança na temperatura (e assim, pressão) do ar. O arrefecimento ou aquecimento de uma região depende em vários fatores, todos relacionados à localização geográfica. Por exemplo, se uma região fica perto do mar ou cercada por montanhas, sendo ou não afetada por grandes tempestades, e assim por diante, determinam as especificações do vento. A velocidade média do vento em uma região é de 10 m/s, por exemplo, enquanto em outra região é apenas 4,5 m/s.

2.5- Representação Espetral do Vento

Para CASTRO (2004), o vento pode também ser descrito no domínio da frequência, isto é, uma medida da energia cinética associada à componente horizontal da velocidade do vento. A esta função, que é obtida a partir de um registo significativo (pelo menos, um ano) de medidas da velocidade do vento, dá-se o nome de densidade espectral de energia. Embora, em rigor, o espectro de vento só seja válido para caracterizar a zona onde se efetuaram as medições tem-se verificado que a sua forma geral se mantém constante.

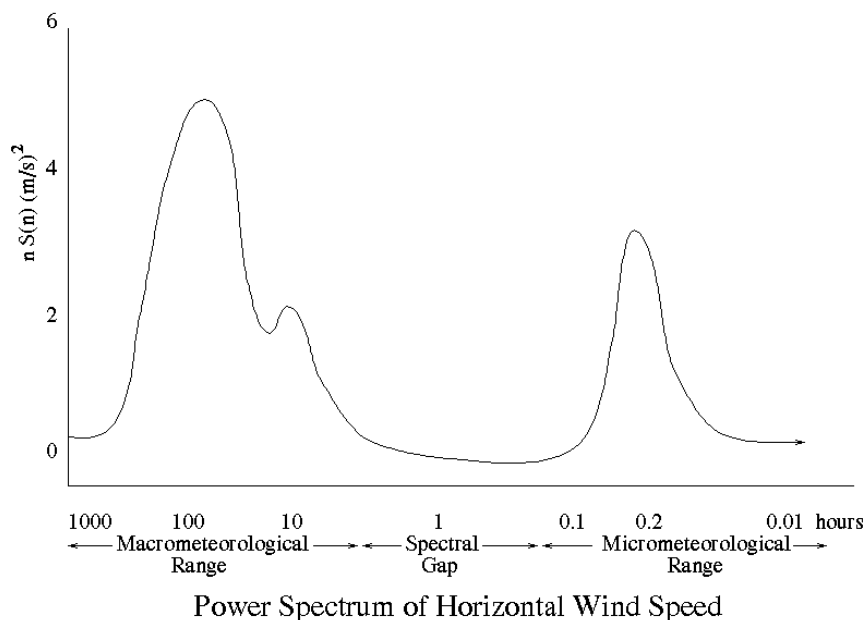


Figura 8- Densidade espectral de energia (Fonte: Castro, 2004)

A análise da Figura 8 revela a existência de dois picos de energia e de um vale, formando três zonas distintas:

- A zona macrometeorológica, associada a frequências baixas (correspondendo a períodos da ordem de alguns dias) e relacionada com o movimento de grandes massas de ar, do tipo depressões ou anticiclones.
- A zona micrometeorológica, associada a frequências mais elevadas (correspondendo a períodos da ordem de poucos segundos) e relacionada com a turbulência atmosférica.
- A zona de vazio espectral, associada a períodos compreendidos aproximadamente entre 10 minutos e 2 horas, e relacionada com zonas do espectro correspondentes a muito pouca energia.

2.6- Cálculos Energéticos

2.6.1- Energia e Potência Extraídas do Vento

Para Dutra (2008), a energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma Velocidade v é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (figura 9), pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção A , transversal ao fluxo de ar, é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4)$$

Onde:

P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m^3]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [m/s]

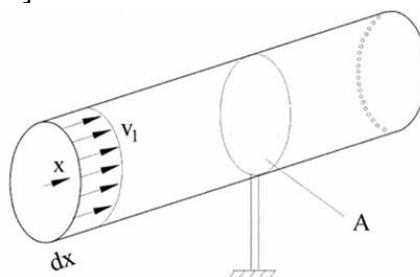


Figura 9- Fluxo de ar através de uma área transversal A (Fonte: Dutra, 2008)

A expressão 4 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência DP, ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor. Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (C_p máximo), o físico alemão Albert Betz³ considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade do vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 10.

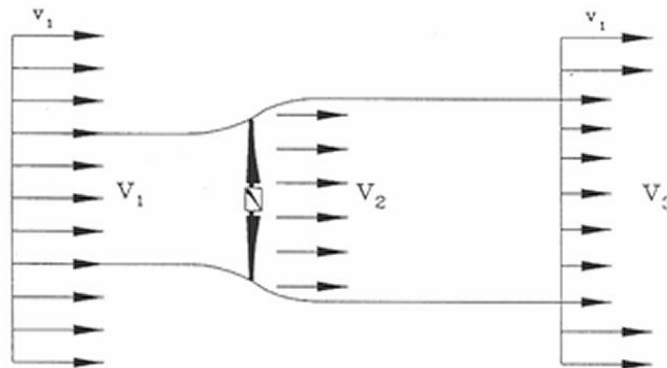


Figura 10- Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. (Fonte: Dutra, 2008)

Como na figura 10, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1 que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade v_3 à jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos que:

³ Albert Betz foi um físico alemão. Nasceu em Schweinfurt, em 25 de dezembro de 1885. Foi um pioneiro do aerogerador.

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (6)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{\text{ex}} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (7)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada por:

$$\dot{E}_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (8)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3 :

A velocidade do vento não é alterada ($v_1 = v_3$) – Neste caso nenhuma potência é extraída;
A velocidade do vento é reduzida a valor zero ($v_3 = 0$) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada. A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v_2 é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (9)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude⁴, pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (10)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 9 e a velocidade v_2 apresentada na equação 10 forem inseridas na mesma equação, tem-se:

$$\dot{E}_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

⁴ Robert Edmund Froude (1889) um dos criadores do modelo matemático da teoria do disco atuador.

Onde:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (12)$$

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (13)$$

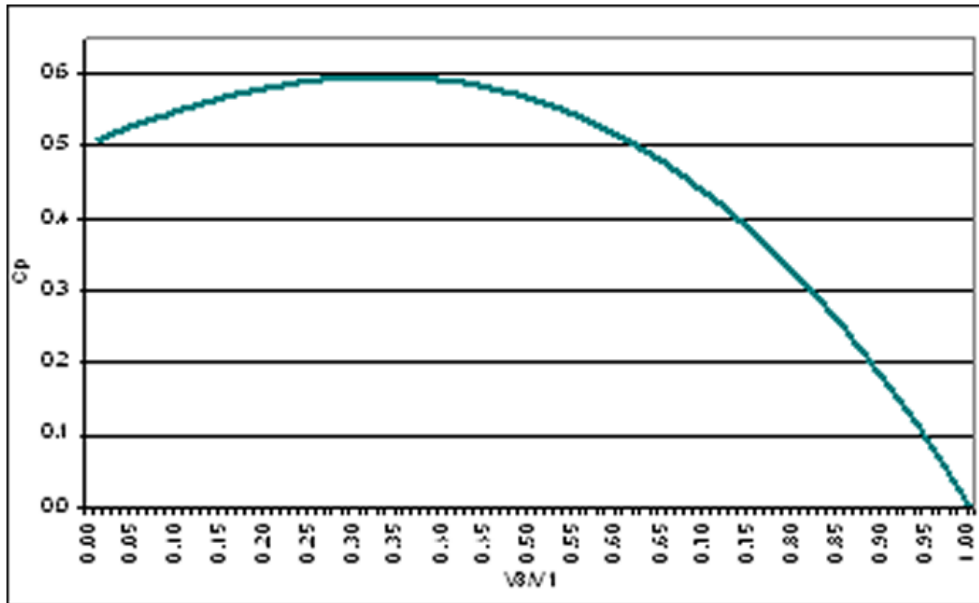


Figura 11- Distribuição de C_p em função de V_3/V_1 (Fonte: Dutra, 2008)

Ao considerar o coeficiente de potência C_p em função de $\frac{v_3}{v_1}$ temos que:

$$C_{p_{\text{Betz}}} = \frac{16}{27} = 0,59$$

Onde: $\frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3}$

2.6.2- Forças atuantes em uma pá do aerogerador

A figura 12 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, assim como os ângulos de ataque (α) e de passo (β). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá (V_{res}), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador (V_{tan}), conforme a equação 14.

$$\overrightarrow{V_{res}} = \overrightarrow{V_w} - \overrightarrow{V_{tan}} \quad (14)$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de V_{res} . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção V_{tan} produz o torque do aerogerador.

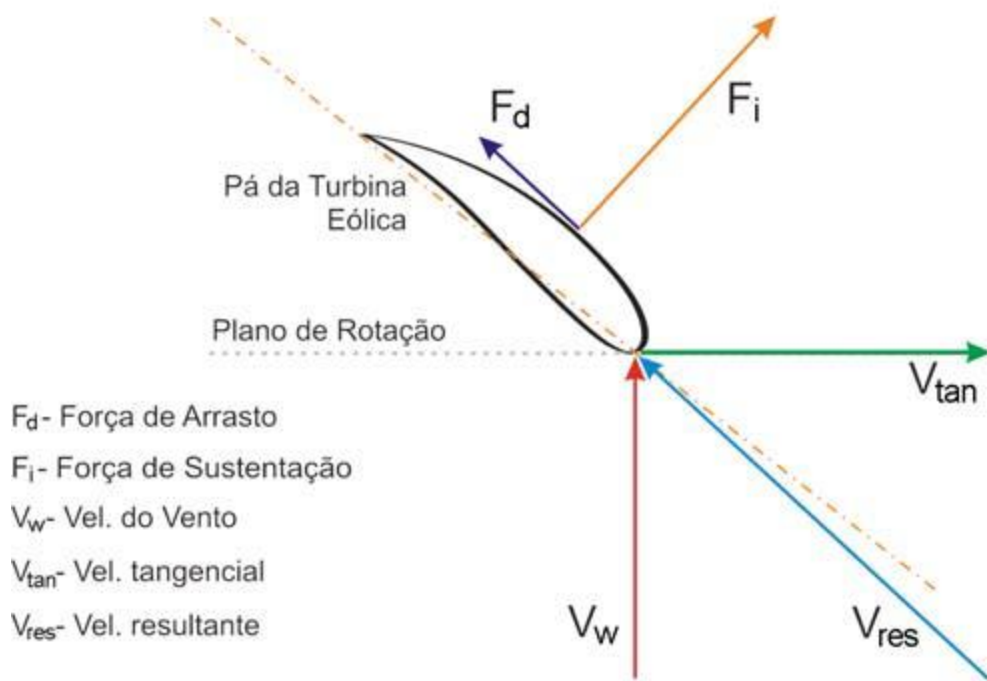


Figura 12- Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador (Fonte: Dutra, 2008)

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações 15 e 16 (PAVINATTO, 2005).

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (15)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R\omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (16)$$

Onde:

C_p – Coeficiente de potência do aerogerador

λ – Razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (tip speed ratio)

ω_{wt} – Velocidade angular do rotor [rad/s]

R – Raio do rotor [m]

ρ – Densidade do ar [Kg/m³]

A – Área varrida pelo rotor [m²]

v_w – Velocidade do vento incidente no rotor [m/s]

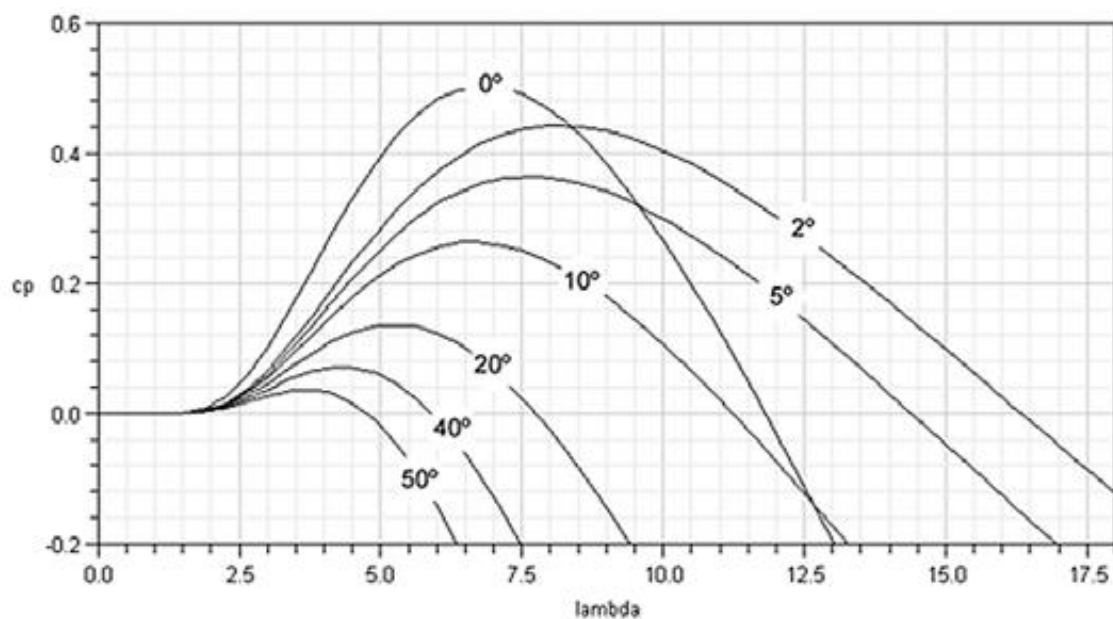


Figura 13- Característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas (Fonte: Montezano, 2007)

Na equação 15, o coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (pitch) do aerogerador. O $C_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional. Aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de C_p para valores dados de λ e β . A figura 13 mostra a característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçada para vários valores de β .

2.6.3- Energia elétrica produtível anualmente

De acordo com Castro (2004) uma vez obtida uma representação do perfil de ventos fiável numa base de tempo alargada, o valor esperado para a energia elétrica produtível anualmente é, no caso geral:

$$E_a = 8760 \int_{U_0}^{U_{máx}} f(\bar{u}) P_e(\bar{u}) d\bar{u} \quad (17)$$

em que $f(\bar{u})$ é a densidade de probabilidade da velocidade média do vento, $P_e(\bar{u})$ é a característica elétrica do sistema de conversão de energia eólica, U_0 é a velocidade de cut-in e $U_{máx}$ é a velocidade de cut-out.

Habitualmente estão disponíveis distribuições discretas, pelo que a equação 17 se transforma em:

$$E_a = \sum_{U_0}^{U_{máx}} f_r(\bar{u}) P_e(\bar{u}) \quad (18)$$

em que $f_r(\bar{u})$ é a frequência relativa de ocorrência da velocidade média do vento: $f_r(\bar{u}) = 8760 f(\bar{u})$.

2.7- Sistemas de Aproveitamento da Energia Eólica

Segundo Marçal (2012), as turbinas eólicas podem ser classificadas em duas categorias, de acordo com a direção do seu eixo de rotação: turbinas de eixo horizontal ou HAWT e turbinas de eixo vertical ou VAWT. Historicamente, as primeiras a aparecerem e com mais desenvolvimento ao longo do tempo são as HAWT. Por essa razão também são as que têm sido comercialmente viáveis.

Ambos os tipos são compostos pelos mesmos componentes:

- Rotor para converter a energia cinética do vento em energia mecânica.
- Torre de suporte da estrutura.
- Caixa de velocidades ou controlo eletrónico de frequência, de modo a poder oferecer a frequência da rede elétrica juntamente com a velocidade de rotação do rotor ideal.
- Sistema de controlo que monitoriza o modo de operação da turbina em modo automático, incluindo arranque e paragem consoante a velocidade do vento.
- Fundação para prevenir que a turbina seja derrubada pela força do vento.
- Gerador, para converter energia mecânica em energia elétrica.

Em termos de vantagens/desvantagens relativamente à utilização de VAWT ou HAWT temos:

VAWT

Vantagens:

- Independência da direção do vento.
- Podem ser colocadas mais perto do chão.
- Pelas razões referidas têm menores esforços no encastramento e manutenção simplificada.
- Espaçamentos menores entre turbinas.
- Instalação menos dispendiosa devido às massas em questão serem menores (mastros).
- Um pequeno investimento, como o trabalho em questão, pode significar um bom retorno pois o desenvolvimento neste tipo de turbinas ainda está no início.

Desvantagens:

- Por terem eixo vertical, o escoamento é não permanente e provoca uma maior fadiga no material.
- Devido à baixa altura a que é colocado o rotor estão expostas a velocidades do vento mais baixas.

HAWT

Vantagens:

- Escoamento em cada secção da pá é constante se a velocidade do vento também o for, maior estabilidade e mais fácil de estudar.
- Menor fadiga do material por ter escoamento permanente para o mesmo ângulo de ataque.
- Mais estudadas.
- Exposição a uma velocidade de vento um pouco maior devido à altura a que é colocado o rotor razão também são as que têm sido comercialmente viáveis.

Desvantagens:

- Necessitam de um mastro maior.
- Maior quantidade de matéria-prima utilizada, devido ao mastro maior e mais resistente.
- Acesso e manutenção dificultada, todo o equipamento encontra-se no topo.
- Maior espaçamento entre turbinas.

2.7.1- VAWT

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis. Os rotores de eixo vertical podem ser movidos por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus e Savonius (DUTRA, 2008).

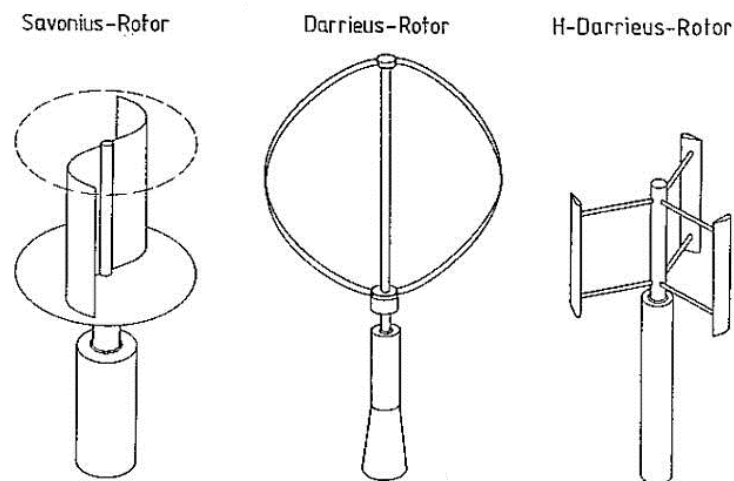


Figura 14- Tipos de rotores de eixo vertical (Fonte: Vitorino, 2012)

2.7.1.1- Rotor do Tipo Darrieus

Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical (DUTRA, 2008).

Turbina do tipo lift, muito investigada com vários protótipos de grandes dimensões construídos e testados mas sem êxito comercial. A forma das pás destina-se a que estas sejam apenas sujeitas a tração mas dificultam a construção das mesmas, tornando-se um

dispositivo caro. A variação da distância dos perfis ao eixo leva a que o escoamento não seja uniforme ao longo da pá, exigindo pás de secção variável para maior eficiência. (SILVA, 2011)



Figura 15- Aerogerador de Rotor tipo Darrieus. (Fonte: <https://evolucaoalp.wordpress.com/2012/06/19/especificacoes-de-projeto/>. Consultado em 21/01/2019)

2.7.1.2- Rotor Tipo Savonius

O rotor do tipo Savonius é um dos mais simples aerogeradores. Este modelo é movido principalmente pela força de arrasto do ar, os esforços exercidos pelo vento em cada uma das faces do corpo oco são de intensidades diferentes, resultando um binário responsável pelo movimento rotativo do conjunto. Sua geometria consiste em dois semicilindros colocadas entre dois discos horizontais que tiveram seus centros deslizados simetricamente (ROCHA, 2017).



Figura 16- Aerogerador de Rotor tipo Savonius. (Fonte: <https://fabricioengmec.blogspot.com/2017/07/historia-da-energia-eolica-e-suas.html>. Consultado em: 21/01/2018)

2.7.1.3- Rotor do Tipo H

Turbina do tipo lift. Funciona como uma turbina Darrieus mas usando perfis direitos e constantes, o que permite uma maior facilidade na produção e transporte, diminuindo os custos. É uma turbina em grande desenvolvimento atualmente. Também denominada Darrieus de pás direitas ou cycloturbine (SILVA, 2011).



Figura 17- Aerogerador de Rotor Tipo H. (Fonte: <https://amgpower.en.made-in-china.com/product/feGEFyHoCOtu/China-1000watt-48V-Residential-Wind-Power-Generator.html>. Consultado em 22/01/2019)

2.7.2- HAWT

Segundo DUTRA (2008), os rotores de eixo horizontal são os mais comuns, e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (lift) e forças de arrasto (drag). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo). Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento. Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás.

Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

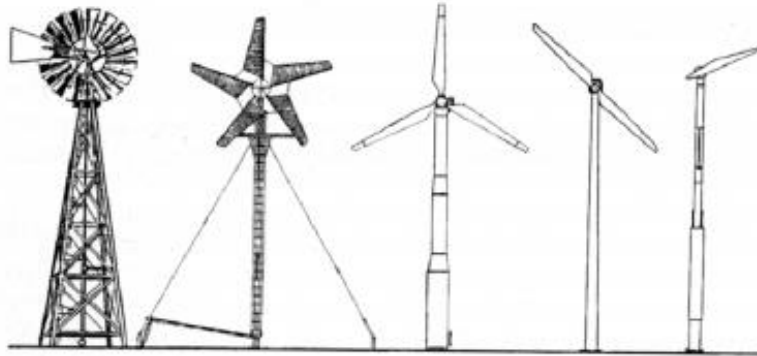


Figura 18- Nº de Pás de diferentes Aerogeradores de Eixo Horizontal
(Fonte: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF. Consultado em 23/01/2019)

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento ou a montante do vento. No primeiro caso, a “sombra” da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a “sombra” das pás provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente. Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás.

2.8- Composição de um Aerogerador de Eixo Horizontal

As principais configurações de um aerogerador de eixo horizontal podem ser vistas na figura 19. Estes aerogeradores são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacelle, pela presença ou não de uma caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado (convencional ou multipólos). A seguir são apresentados os principais componentes do aerogerador que são, de uma forma geral, a torre, a nacelle e o rotor (DUTRA, 2008).

Legenda dos Componentes da Nacelle (Figura 20)				
1. Controlador do Cubo	5. Aquecedor de óleo	9. Controladores e Inversores	13. Rolamento das pás	17. Motores de posicionamento da nacelle
2. Controle pitch	6. Caixa multiplicadora	10. Sensores de direção e velocidade do vento	14. Sistema de trava do rotor	18. Luva de acoplamento
3. Fixação das pás no cubo	7. Sistema de freios	11. Transformador de alta tensão	15. Sistema hidráulico	19. Gerador
4. Eixo principal	8. Plataforma de serviços	12. Pás	16. Plataforma da nacelle	20. Aquecimento de ar

Quadro 1- Legenda dos Componentes da Nacelle de um Aerogerador Convencional

Para Castro (2004) na Nacelle ou cabina estão alojados, entre outros equipamentos, o veio principal, o travão de disco, a caixa de velocidades (quando existe), o gerador e o mecanismo de orientação direcional. O veio principal de baixa rotação transfere o binário primário do rotor para a caixa de velocidades. Neste veio estão montadas as tubagens de controlo hidráulico dos travões aerodinâmicos (se forem necessários). Em situações de emergência devidas a falha no travão aerodinâmico ou para efetuar operações de manutenção é usado um travão mecânico de disco. Este travão tanto pode estar situado no veio de baixa rotação como no veio de alta rotação, após a caixa de velocidades. Na segunda opção, o travão é menor e mais barato, pois o binário de travagem a fornecer é menor. Contudo, na eventualidade de uma falha na caixa de velocidades, não há controlo sobre o rotor. A caixa de velocidades (quando existe) é necessária para adaptar a frequência do rotor da turbina, tipicamente da ordem de 0,33 Hz (20 rpm) ou 0,5 Hz (30 rpm), à frequência do gerador, isto é, da rede elétrica de 50 Hz. O gerador converte a energia mecânica disponível no veio de alta rotação em energia elétrica. A ligação mais flexível do gerador assíncrono, permitida pelo escorregamento, tem levado a maior parte dos fabricantes a escolhê-lo como equipamento de conversão mecano-elétrica; já a

ligação rígida característica do gerador síncrono não se adapta bem às variações do vento, pelo que este conversor só é usado em sistemas de velocidade variável. É, ainda, necessário que o rotor fique alinhado com a direção do vento, de modo a extrair a máxima energia possível. Para executar esta função, existe o mecanismo de orientação direcional, constituído essencialmente por um motor, o qual, em face da informação recebida de um sensor de direção do vento, roda a nacelle e o rotor até que a turbina fique adequadamente posicionada. No cimo da cabina está montado um anemómetro e o respetivo sensor de direção. As medidas da velocidade do vento são usadas pelo sistema de controlo para efetuar o controlo da turbina, nomeadamente, a entrada em funcionamento, a partir da velocidade de aproximadamente 5 m/s, e a paragem, para ventos superiores a cerca de 25 m/s. A informação da direção do vento é usada como entrada do sistema de orientação direcional.

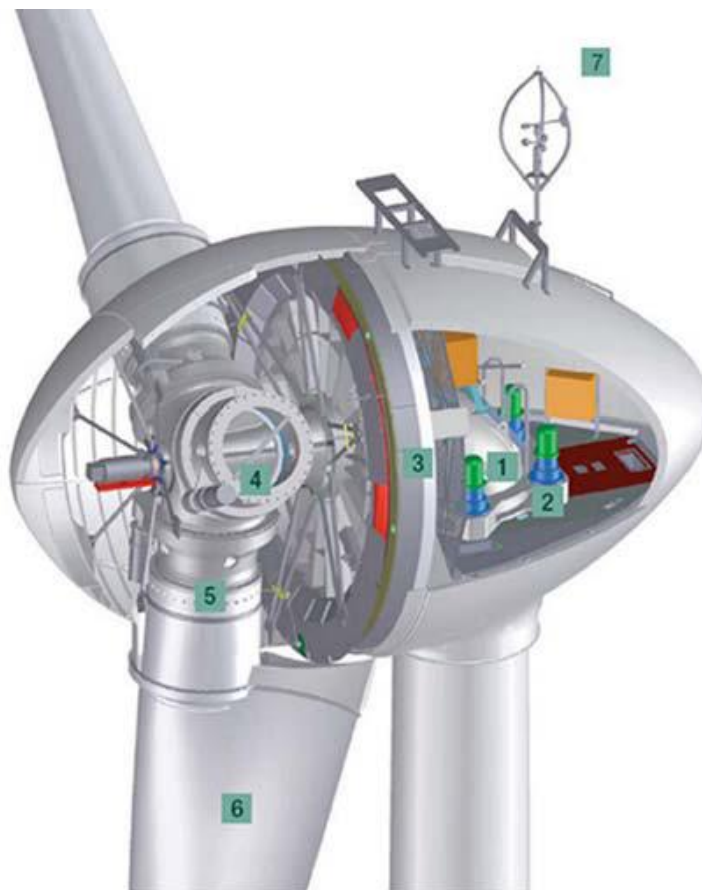


Figura 21- Vista do interior da nacelle de um Aerogerador utilizando um gerador multipólos (Fonte: Dutra, 2008)

Legenda dos Componentes da Nacelle (Figura 21)			
1. Apoio principal da nacelle	2. Motores de orientação da nacelle	3. Gerador em anel (multipólos)	4. Fixador das pás ao eixo
5. Cubo do rotor	6. Pás	7. Sensores de direção e velocidade do vento	

Quadro 2- Legenda dos componentes de um Aerogerador com gerador multipólos (Fonte: Dutra, 2008)

2.8.2- Rotor

Segundo Castro (2004), o projeto das pás do rotor, no qual a forma da pá e o ângulo de ataque em relação à direção do vento têm uma influência determinante, beneficiou do conhecimento da tecnologia das asas dos aviões, que apresentam um funcionamento semelhante. Em relação à superfície de ataque do vento incidente nas pás, o rotor pode ser colocado a montante ou a jusante da torre. A opção upwind, em que o vento ataca as pás pelo lado da frente, generalizou-se devido ao facto de o vento incidente não ser perturbado pela torre. A opção downwind, em que o vento ataca as pás pelo lado de trás, permite o auto alinhamento do rotor na direção do vento, mas tem vindo a ser progressivamente abandonada, pois o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor. Define-se solidez como sendo a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas. Se o diâmetro e a solidez das pás forem mantidos constantes, o rendimento aumenta com o número de pás: isto acontece, porque diminuem as chamadas perdas de extremidade. O acréscimo na energia capturada ao vento está estimado em cerca de 3 a 5% quando se passa de duas para três pás, mas esta percentagem vai-se tornando progressivamente menor à medida que se aumenta o número de pás. Esta razão motivou que a grande maioria das turbinas em operação apresente rotores com três pás, muito embora a solução com duas pás configure benefícios relacionados com a diminuição de peso e de custo. Por outro lado, é necessário que o cubo do rotor (local de fixação das pás) possa baloiçar, isto é, que apresente um ângulo de inclinação relativamente à vertical, de forma a acomodar os desequilíbrios resultantes da passagem das pás em frente à torre. Esta questão assume relevância acrescida no desenho do rotor de duas pás. Os rotores de

uma só pá foram objeto de investigação, tendo sido construídos alguns protótipos; contudo, não conheceram desenvolvimento comercial, dada a sua natureza inerentemente desequilibrada. A vida útil do rotor está relacionada com os esforços a que fica sujeito e com as condições ambientais em que se insere. A seleção dos materiais usados na construção das pás das turbinas é, pois, uma operação delicada: atualmente, a escolha faz-se entre a madeira, os compostos sintéticos e os metais. A madeira é o material de fabrico de pás de pequena dimensão (da ordem de 5 m de comprimento). Mais recentemente a madeira passou a ser empregue em técnicas avançadas de fabrico de materiais compósitos de madeira laminada. Atualmente há alguns fabricantes a usar estes materiais em turbinas de 40 m de diâmetro. Os compostos sintéticos constituem os materiais mais usados nas pás das turbinas eólicas, nomeadamente, plásticos reforçados com fibra de vidro⁵. Estes materiais são relativamente baratos, robustos, resistem bem à fadiga, mas, principalmente, são facilmente moldáveis, o que é uma vantagem importante na fase de fabrico. Sob o ponto de vista das propriedades mecânicas, as fibras de carbono constituem a melhor opção. Contudo, o seu preço elevado é ainda um obstáculo que se opõe a uma maior difusão. No grupo dos metais, o aço tem sido usado, principalmente nas turbinas de maiores dimensões. Contudo, é um material denso, o que o torna pesado. Em alternativa, alguns fabricantes optaram por ligas de alumínio que apresentam melhores propriedades mecânicas, mas têm a desvantagem de a sua resistência à fadiga se deteriorar rapidamente. A tendência atual aponta para o desenvolvimento na direção de novos materiais compósitos híbridos, por forma a tirar partido das melhores características de cada um dos componentes, designadamente sob o ponto de vista do peso, robustez e resistência à fadiga.

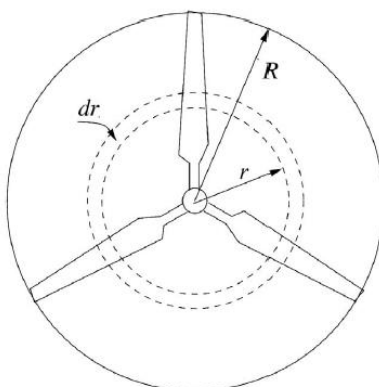


Figura 22- Rotor de um Aerogerador de 3 Pás com raio R (Fonte: Hansen, 2008)

⁵ GRP - Glass Reinforced Plastic.

2.8.3- Torre

Castro (2004) afirma que, a torre suporta a nacelle e eleva o rotor até uma cota em que a velocidade do vento é maior e menos perturbada do que junto ao solo. As torres modernas podem ter sessenta e mais metros de altura, pelo que a estrutura tem de ser dimensionada para suportar cargas significativas, bem como para resistir a uma exposição em condições naturais ao longo da sua vida útil, estimada em cerca de vinte anos. Os fabricantes têm-se dividido entre dois tipos de torres: tubulares (Figura 23) e entrelaçadas (Figura 24).



Figura 23- Torre Tubular (Fonte: Castro, 2004) Figura 24- Torre Entrelaçada (Fonte: Castro, 2004)

Para fabricar as torres tubulares pode usar-se aço ou betão, sendo, normalmente os diversos troços fixados no local com uma grua. Estas torres são mais seguras para o pessoal da manutenção, que pode usar uma escada interior para aceder à plataforma da nacelle. As torres entrelaçadas são mais baratas, as fundações são mais ligeiras e o efeito de sombra da torre é atenuado; contudo, têm vindo a ser progressivamente abandonadas especialmente devido a questões ligadas com o impacto visual.

2.8.4- Pás, Cubo e Eixo

Segundo Dutra (2008), as pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epóxi⁶. Nos aerogeradores que usam controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar, modificando assim seu ângulo de ataque. As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica a frente do aerogerador denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para os aerogeradores que utilizem o controle de velocidade por passo, o cubo, além de apresentar os rolamentos para fixação das pás, também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás. É importante citar que por se tratar de uma peça mecânica de alta resistência, o cubo é montado de tal forma que, ao sair da fábrica, este apresenta-se como peça única e compacta viabilizando que, mesmo para os aerogeradores de grande porte, seu transporte seja feito sem a necessidade de montagens no local da instalação. O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. É construído em aço ou liga metálica de alta resistência.



Figura 25- Detalhe de um cubo para conexão de pás (Fonte: Dutra, 2008)

⁶ Epóxi ou Poliepóxido é um polímero termofixo que se endurece quando se mistura com um agente catalisador ou endurecedor.

2.8.5- Transmissão e Caixa Multiplicadora

Dutra (2008) afirma que a transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais. A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (tip speed). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham em rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1.200 a 1.800 rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos. Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construí-los. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores multipólos de baixa velocidade e grandes dimensões. Os dois tipos de projetos possuem suas vantagens e desvantagens e a decisão em usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é, antes de tudo, uma questão de filosofia do fabricante.



Figura 26- Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista à direita) (Fonte: Dutra, 2008)

2.8.6- Gerador

Segundo Dutra (2008), a transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletromecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado. Entretanto, a integração de geradores no sistema de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- Variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- Variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- Exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;
- Dificuldade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação ao sistema de conversão de energia eólica.

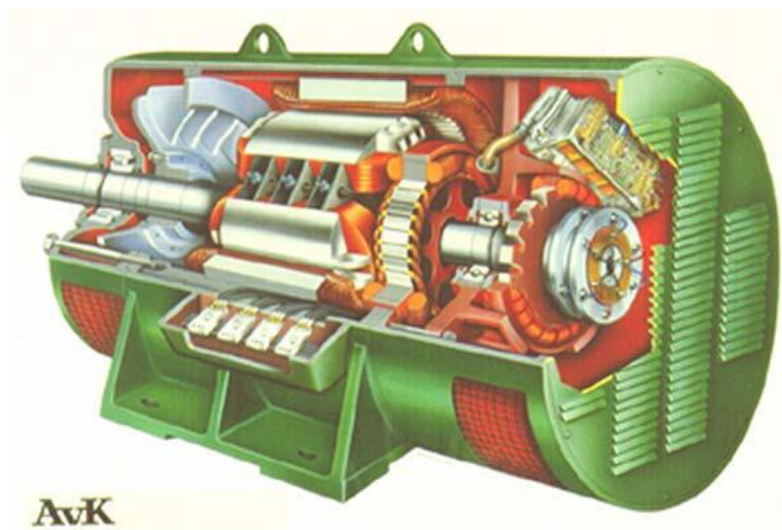


Figura 27- Gerador convencional (Fonte: Dutra, 2008)

2.9- Mecanismos de Controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga). Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência à potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (Stall) e controle de passo (Pitch). No passado, a maioria dos aerogeradores usavam o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo, que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas. (DUTRA,2008).

2.9.1- Controle de Passo (Controle Pitch)

De acordo com Dutra (2008), o controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal.

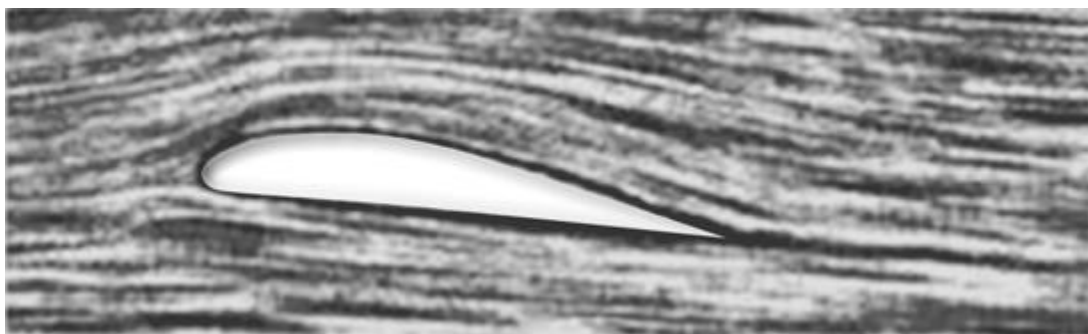


Figura 28- Fluxo aderente ao perfil (Fonte: Dutra,2008)

Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície (Figura 28), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. Aerogeradores com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo controladas por stall, porque necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- Permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais.
- Alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas).
- Maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá).
- Partida simples do rotor pela mudança do passo.
- Fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor.
- Cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal.
- Posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos.
- Massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

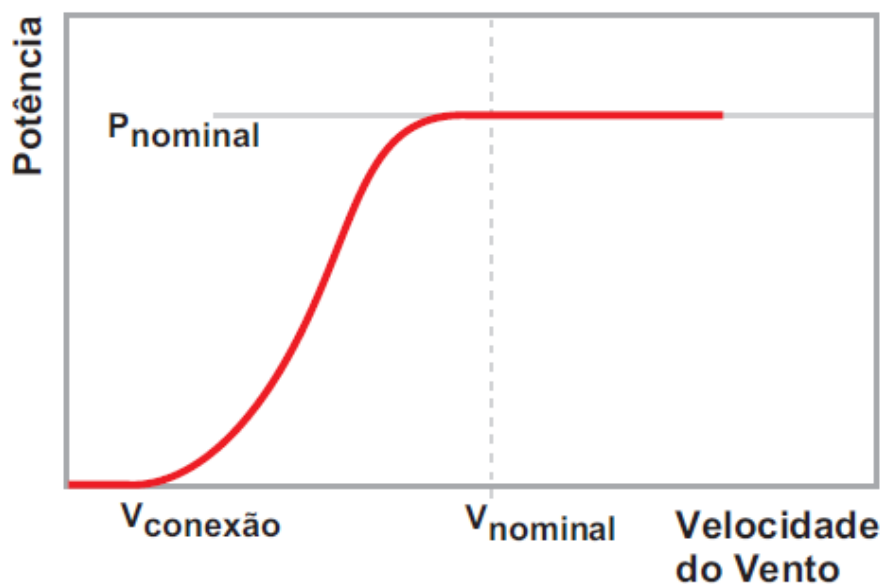


Figura 29- Curva de Potência de um Aerogerador com Controle de Passo
(Fonte: Dutra, 2008)

2.9.2- Controle Estol (Controlo Stall)

Segundo Dutra (2008), o controlo Stall ⁷ é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol) reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito stall ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.

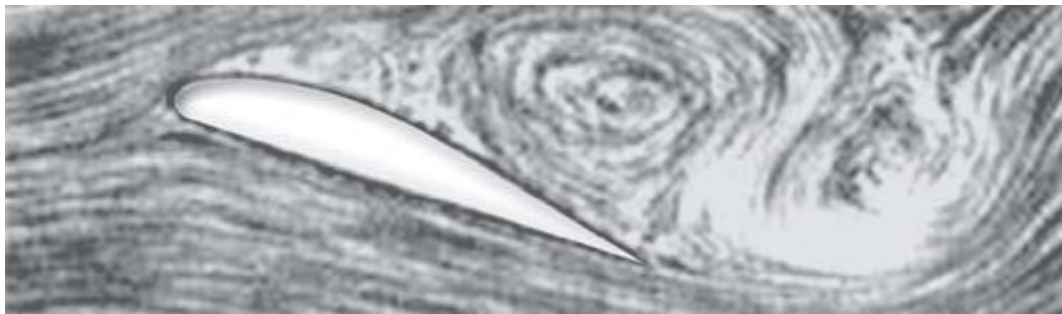


Figura 30- Fluxo separado (estol) em volta do perfil (Fonte: Dutra, 2008)

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas. Aerogeradores com controlo stall são mais simples do que as de controlo de passo porque eles não necessitam de um sistema de mudança de passo. Em comparação com os aerogeradores com controlo de passo, eles possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- Inexistência de sistema de controlo de passo.
- Estrutura de cubo do rotor simples.
- Menor manutenção devido a um número menor de peças móveis.
- Auto confiabilidade do controle de potência.

⁷ Stall Controll

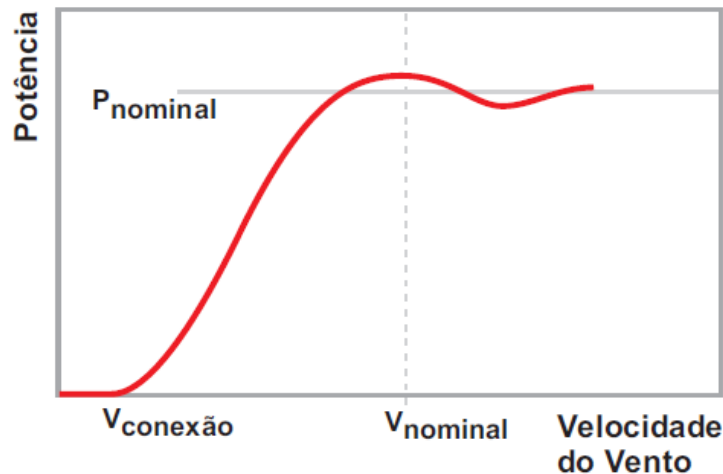


Figura 31- Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo Stall (Fonte: Dutra, 2008)

2.9.3- Controle YAW

Para Hemami (2012), ao trabalhar, uma turbina eólica de eixo horizontal deve se orientar com a direção do vento. Esta é uma das funções automatizadas de uma turbina baseada na determinação da direção do vento em cada instante. O controle Yaw pode ser independente das outras funções. Um número de motores, por exemplo, oito, trabalhando em paralelo são empregados para este propósito. O arranjo pode ser diferente de uma turbina para outra. No entanto, este mecanismo consiste em uma grande coroa (aproximadamente o tamanho da parte superior da torre), e os motores de guinada através de um conjunto de engrenagens ativam a coroa. Isso vira a nacelle em relação à torre com um movimento lento. Figura 32 mostra os motores de engrenagem de guinada para uma turbina eólica Vestas 82. Os cabos na imagem são a saída do gerador, que se estendem até o fundo da torre.

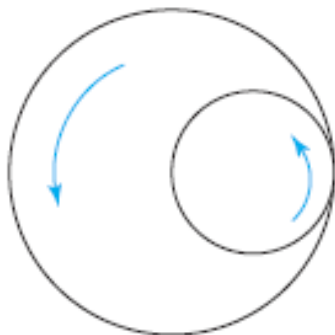


Figura 33- Rotação das engrenagens em forma de coroa (Fonte:Hemami,2012)



Figura 32-Um dos oito motores de engrenagem de guinada de um Vestas V-82, visto de dentro da Nacelle (Fonte: Hemami, 2012)

2.10- Sistema Elétrico de um Aerogerador

2.10.1- Aerogeradores com Velocidade Constante

Conforme Dutra (2008), nos aerogeradores com velocidade constante, o gerador é diretamente conectado à rede elétrica. A frequência da rede determina a rotação do gerador e, portanto, a do aerogerador. A baixa rotação do aerogerador n_t é transmitida ao gerador, de rotação n_g por um multiplicador com relação de transmissão r . A velocidade do gerador depende do número de polos p e da frequência do sistema elétrico f são dados por:

$$n_t = \frac{n_g}{r} \quad n_g = \frac{f}{p} \quad n_t = \frac{f}{r \cdot p} \quad (19)$$

Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos, ou de indução, cuja maior vantagem é sua construção simples e barata, além de dispensarem dispositivos de sincronismo. As desvantagens destes geradores são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. As altas correntes de partida podem ser suavizadas por um tiristor de corrente, ou de partida.

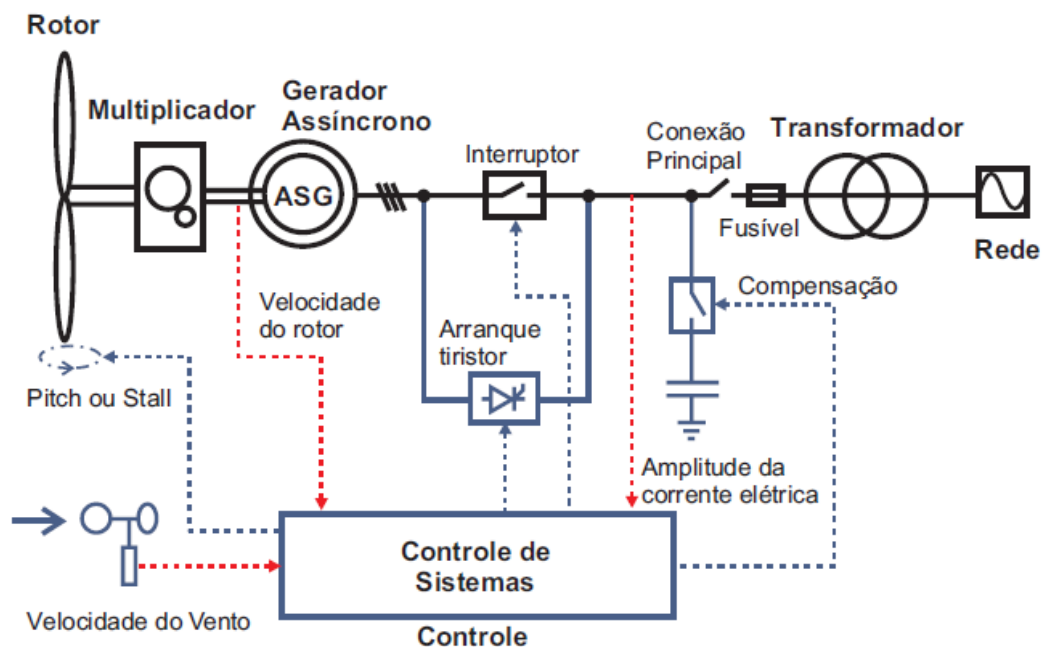


Figura 34- Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (Fonte: Dutra, 2008)

2.10.2- Aerogeradores com Velocidade Variável

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos. A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente através dos tirístores. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da rotação da turbina eólica. Entretanto, por meio do conversor, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico. (DUTRA, 2008).

Quando são usados geradores assíncronos, ou de indução, é necessário prover energia reativa para a excitação do gerador, que pode ser feita por autoexcitação, usando-se capacitores adequadamente dimensionados, de forma similar ao caso do aerogerador com velocidade constante. Neste caso, deve-se instalar os capacitores antes do retificador, uma vez que o conversor de frequência faz isolamento galvânico no sistema, não permitindo a absorção de energia reativa externa, seja do sistema elétrico ou de capacitores. (CUSTODIO, 2002)

Outra alternativa é o uso de geradores assíncronos duplamente alimentados, isto é, com dois enrolamentos que apresentam velocidades síncronas diferentes. O uso de enrolamento rotórico associado a uma resistência variável, em série, permite o controle da velocidade do gerador pela variação do escorregamento, mantendo a frequência elétrica do gerador no valor definido pelo sistema elétrico ao qual o aerogerador está conectado. A ideia básica do aerogerador com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, conseqüentemente, do rotor do aerogerador, da frequência elétrica da rede. O rotor pode funcionar com velocidade variável ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo um desempenho aerodinâmico maximizado. Uma vantagem é a redução das flutuações de carga mecânica. As desvantagens são os altos esforços de construção e a geração de harmônicos, associados à conversão de frequência, quem podem ser reduzidos significativamente com o uso de filtros que, por sua vez, aumentam os custos. (CUSTODIO, 2002)

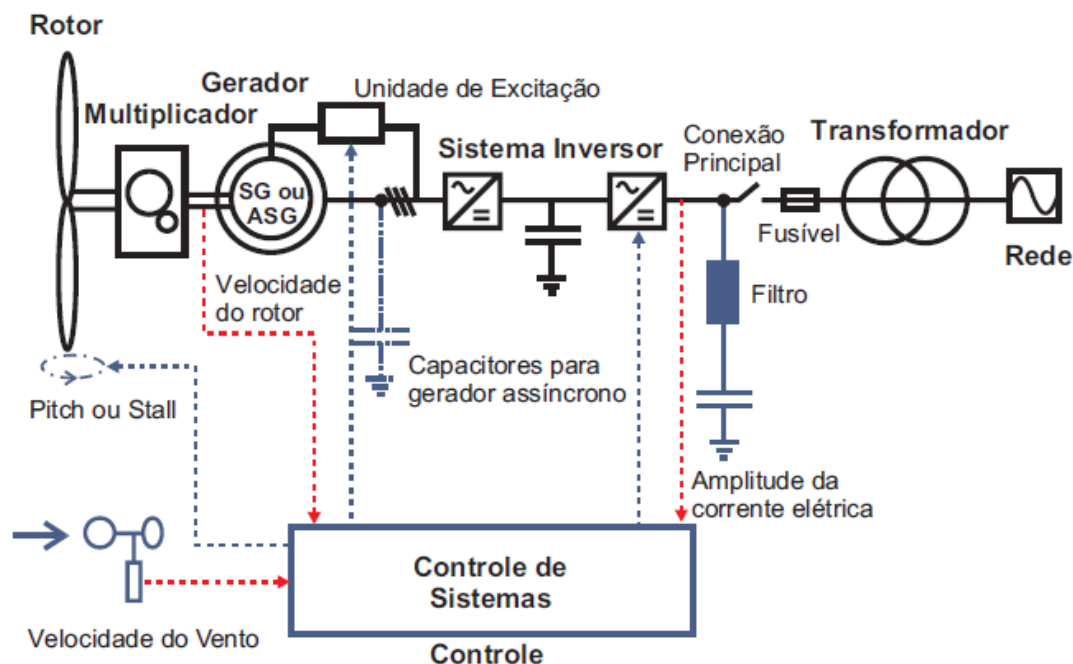


Figura 35- Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa um conversor de frequência para o controle da frequência da geração elétrica (Fonte: Dutra, 2008)

2.11- Aplicações dos Sistemas Eólicos

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controlo de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento.



Figura 36-Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações (Fonte: Dutra, 2008)

2.11.1- Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida. (DUTRA,2008)

De acordo com o autor acima citado, Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como principal objetivo evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda. Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor do ponto de máxima potência necessário para otimização da potência produzida. Este sistema é usado quando se deseja utilizar eletrodomésticos convencionais.

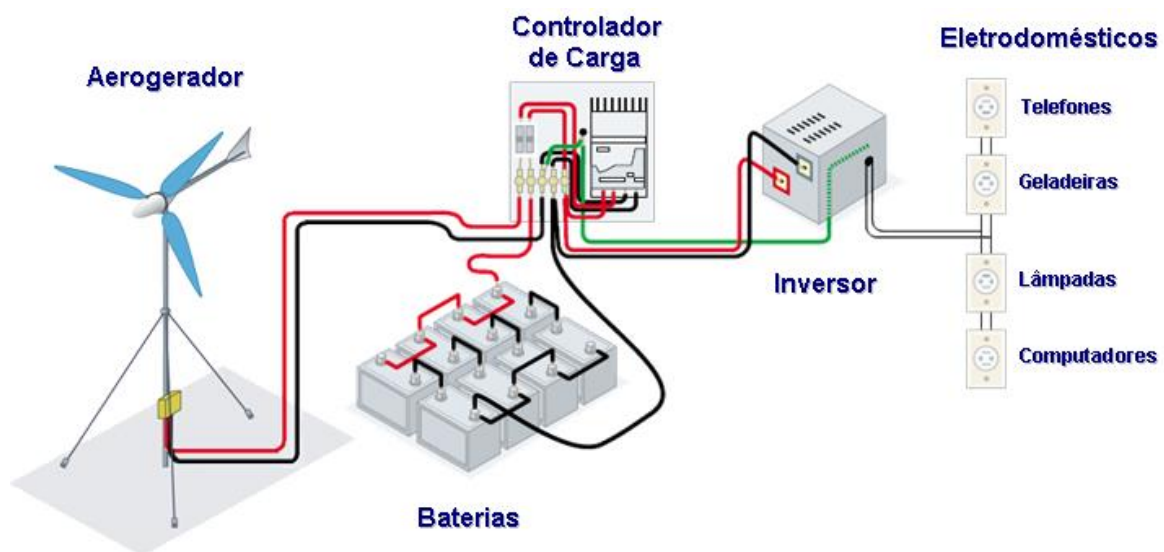


Figura 37-Configuração de um sistema eólico isolado. (Fonte: Dutra,2008)

2.11.2- Sistemas Híbridos

Segundo Dutra (2008), os sistemas híbridos são aqueles que apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração Diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário. Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

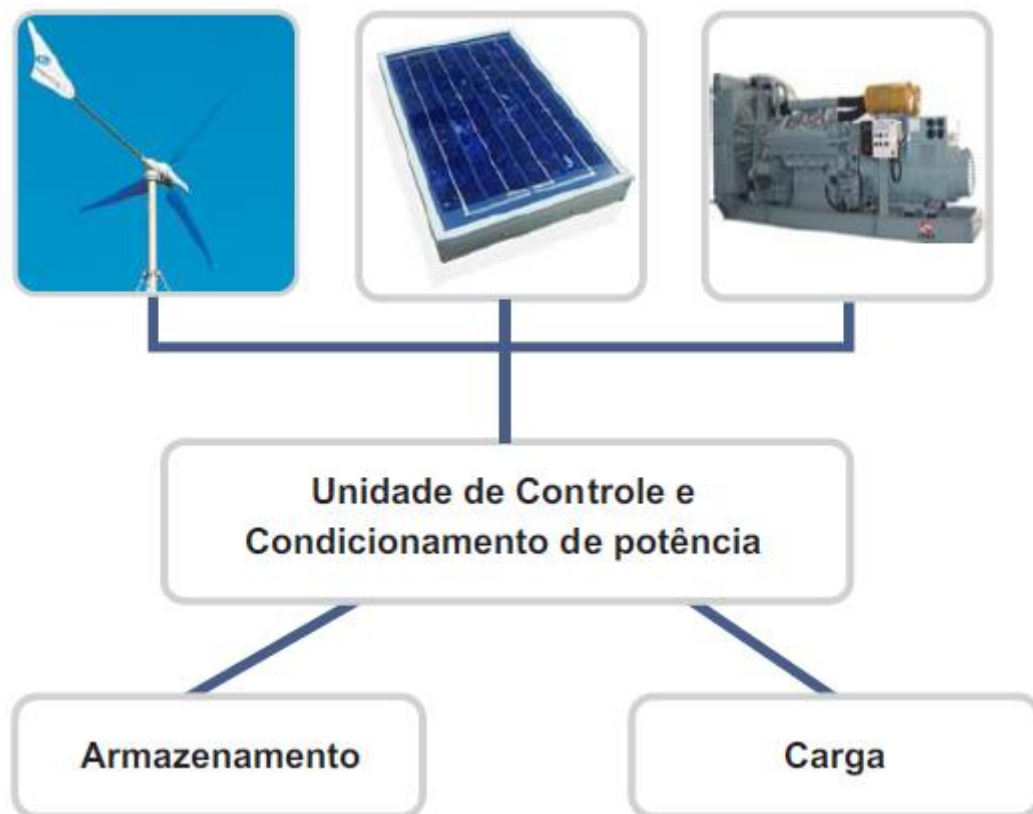


Figura 38-Configuração de um sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel. (Fonte: Dutra, 2008)

2.11.3- Sistemas Interligados à Rede

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede soma aproximadamente 120 GW. (DUTRA, 2008).



Figura 39- Parque eólico conectado à rede (Fonte: Dutra, 2008)

2.11.4- Sistemas Offshore

As instalações offshore representam a nova fronteira da utilização da energia eólica. Embora representem instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações offshore têm crescido a cada ano principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra. A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, os projetos offshore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. Todo o projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança (DUTRA, 2008).



Figura 40- Parque Eólico Offshore (Fonte: Dutra, 2008)

III- DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1- Localização do Parque

O parque eólico encontra-se localizado na Zona rural de Ribeira de Vinha que fica no Sul da Ilha de São Vicente, a cerca de 3 Km do centro da Cidade do Mindelo.



Figura 41- Localização da Zona da Ribeira de Vinha (Fonte: Google Maps)

O parque situa-se no Monte Ribeira de Julião nas Coordenadas $16^{\circ} 51'57''N$ e $24^{\circ} 59' 54'' W$.



Figura 42- Parque Eólico no Monte Ribeira de Julião (Fonte: Google Earth)

3.2- Historial do Parque da Ribeira de Vinha

3.2.1- Ficha Técnica do Antigo Projeto

O Parque Eólico da Ribeira de Vinha (ou Parque Eólico Nº1 de Mindelo), localizado no Monte Ribeira de Julião, de Agosto de 1989, teve como Dono da Obra a Entidade Pública de Eletricidade e Água, ELECTRA, obra essa financiada pelos Governos de Cabo Verde e da República Federal Alemã e também pela Kreditanstalt Für Wiederaufbau. Teve projeto e Engenharia feita pela Decon-Deutsche Energie-Consult com planeamento e fiscalização feita pela Decon e também pela ELECTRA. A construção civil do Parque ficou a cargo da Cooperativa de Construção Civil. Os aerogeradores na altura instalados eram da Man Technologie e operavam perante uma velocidade média do vento de 8,4 m/s.

3.2.2- Características do Antigo Projeto

O parque Eólico de Mindelo (ou Parque Eólico da Ribeira de Vinha) que foi instalado no Monte Ribeira de Julião contava com uma potência total de 300 KW distribuída por dez aerogeradores de 30 KW cada. Os aerogeradores foram equipados com geradores assíncronos que geravam 400 Volts e encontravam-se ligados a uma subestação elevadora de tensão a 6000/20000 Volts, que ligava-se a rede existente.

3.2.3- Características do Equipamento

O aerogerador propriamente dito, foi montado no topo duma torre metálica de 15 metros de altura. Cada aerogerador auto orientável ao vento, entrava automaticamente em paralelo com a rede quando a velocidade do vento fosse 3,7 m/s, e atingia sua potência nominal a 11,4 m/s. Com base na frequência e amplitudes de velocidade de Vento recolhidos, estimava-se que os dez aerogeradores produzissem anualmente, cerca de 10% das necessidades de consumo da cidade do Mindelo.

3.2.4- Características dos Antigos Aerogeradores

Rotor

Número de pás: 2

Diâmetro: 12,5 m

Velocidade (à potência nominal): 100 rpm

Ângulo de inclinação: 0°

Área Varrida: 123 m²

Cp_{max} do rotor: 0,44

Localização: Barlavento

Gerador

Tipo: Gerador Indutivo

Potência: 30 KW

Fator de Potência: 0,86

Voltagem: 380/220 V

Frequência: 50 Hz

Velocidade (à potência Nominal): 1620 RPM

Performance

Potência Nominal: 30 KW

Velocidade Nominal: 11,4 m/s

Velocidade do Vento no arranque: 3,7 m/s

Máxima Velocidade Admissível: 50 m/s

Pesos

Rotor e Pás: 110 Kg

Aerogerador: Aprox. 1040 Kg

Torre (15m): Aprox. 2850 Kg

Total: Aprox. 4000 Kg

Torre

Em tubo cônico de Aço (Octogonal): 15 m

Altura até o Cubo: 16 m

Pás

Material: GREP

Perfil da Pá: NACA 4415-4424

Transmissão

Tipo: Caixa Multiplicadora de 3 Andares

Relação de Transmissão: 1 : 16,2

Sistema de Controlo

Princípio: Electro-hidráulico e controlo por ajustamento das pás

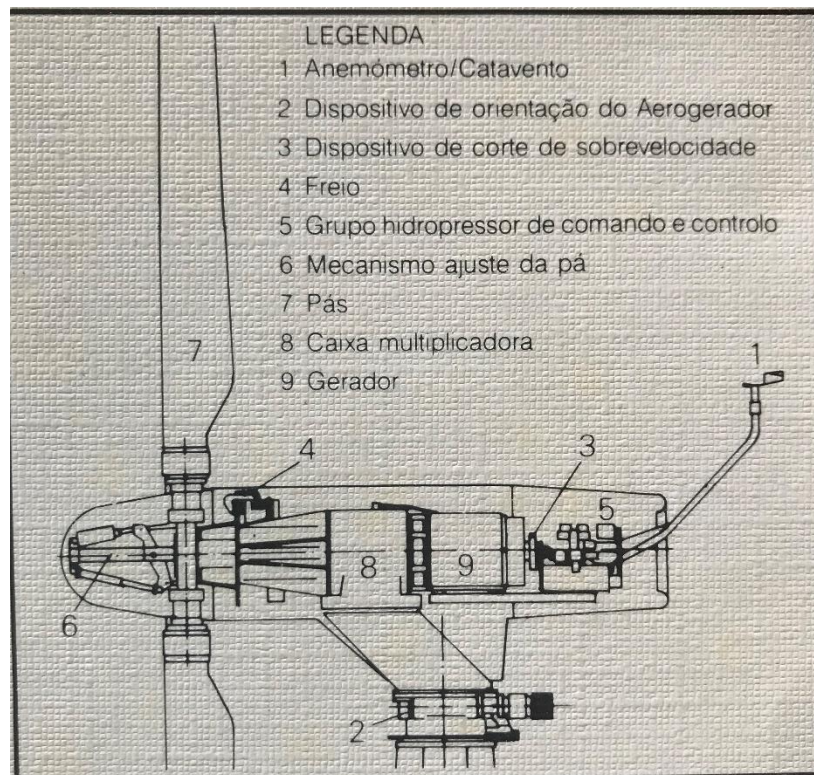


Figura 43- Legenda dos componentes dos Aerogeradores Aeroman (Fonte: Parque Eólico Nº1 de Mindelo, 1989)

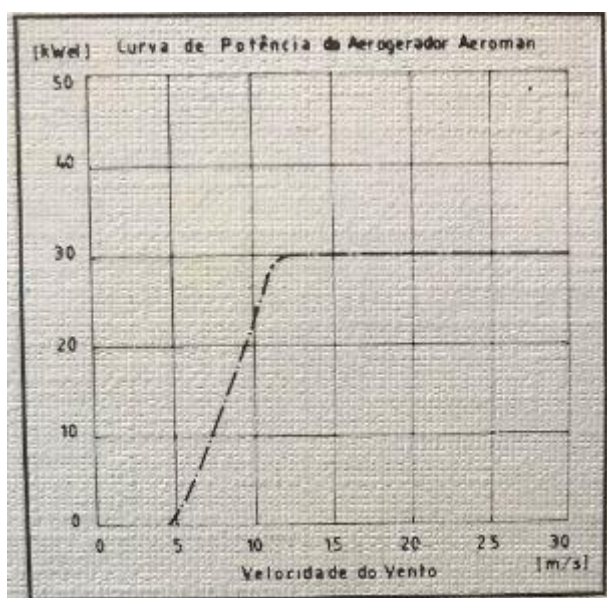


Figura 45- Curva de Potência do Aerogerador Aeroman (Fonte: Parque Eólico Nº1 de Mindelo, 1989)

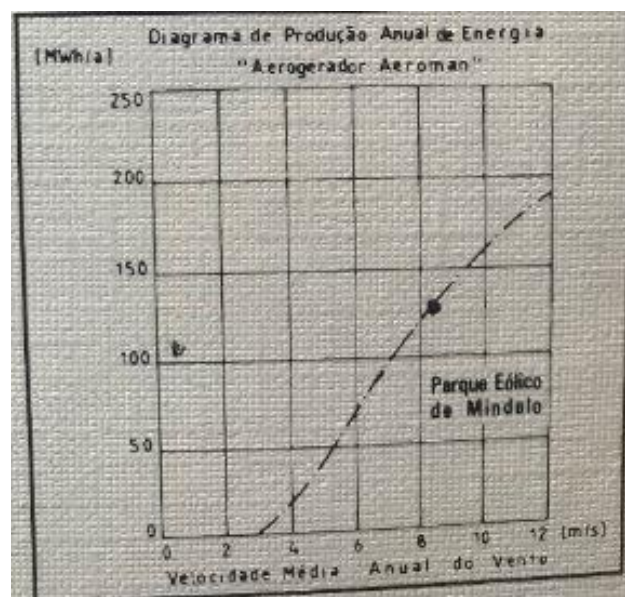


Figura 44- Produção Anual Do Aerogerador Aeroman (Fonte: Parque Eólico Nº1 de Mindelo, 1989)

3.2.5- Caracterização do Investimento

O custo total do projeto foi de 82 000 000 ECV (82 mil contos), dos quais 90% foram comparticipados a fundo perdido pela República Federal Alemã através do Banco KFW, e os restantes 10% diretamente suportados pela ELECTRA, que cobriram o custo do Ramal de ligação do Parque, os trabalhos de construção civil e montagem do equipamento. O custo dos aerogeradores e todos os seus componentes representa cerca de 75% do investimento.


3.2.6- Aspetos Económicos

O parque Eólico permitiu prever uma produção anual de energia que deveria variar entre 1190 e 1460 MWh. Na base dos custos do investimento, custos anuais de manutenção e conservação (no valor de 4% dos custos das instalações), uma vida útil de 20 anos (indicada pelo fabricante) assim como uma taxa de desconto de 5%, calculou-se, com a produção acima indicada um custo dinâmico de uma produção dentro da faixa de 5 a 6 ECV.

3.3- Dimensionamento do Projeto de Reabilitação

Segundo o relatório de contas da ELECTRA (2016), a Ilha de São Vicente tem uma potência disponível de 24 200 kW (24,2 MW), como mostra a Tabela 4.

Para o dimensionamento deste projeto será considerado apenas a potência de 17 600 kW (17,6 MW) disponível na Central do Lazareto, visto que os restantes 6 600 kW (6,6 MW) da Central da Mاتيota são, desde alguns anos, utilizados apenas como Backup.



ELECTRA NORTE, SOCIEDADE UNIPESSOAL SA

Repartição da potência a 31.12.2016 (kW)

Ilha	Unidade de Produção	Térmica		Solar		Potência Total	
		Nominal	Disponível	Instalada	Disponível	Instalada	Disponível
Santo Antão	Porto Novo	6 000	5 086			6 000	5 086
	Ribeira Grande	3 800	2 680			3 800	2 680
		9 800	7 766	0	0	9 800	7 766
	Matiota	10 000	6 600	0		10 000	6 600
S. Vicente	Lazareto	17 800	17 600			17 800	17 600
		27 800	24 200	0		27 800	24 200
	Tarrafal	8 525	6 820			8 525	6 820
S. Nicolau		8 525	6 820	0		8 525	6 820
Sal	Palmeira	15 125	12 100	3 200	2 500	18 325	14 600
Total Electra		61 250	50 886	3 200	2 500	64 450	53 386

Tabela 4- Repartição de Potência da ELECTRA Norte (Fonte: Relatório de Contas da Electra Norte 2016)

Para além desses 17 600 kW da central do Lazareto (correspondentes aos grupos geradores) existe ainda a parcela renovável correspondente aos Parques Eólicos.

O Parque da Cabeólica, que dispõe de 5 950 kW (7 Aerogeradores de 850 kW), e outro da ELECTRA (explorada pela Eletric Wind), que dispõe de 900 kW (3 Aerogeradores de 300 kW).

A contribuição renovável total será então: $5950 + 900 = 6850$ kW.

Segundo o Engenheiro Arikson Santana (Engenheiro na Área de Redes da ELECTRA e Docente da Universidade do Mindelo na disciplina de Análise de Redes de Energia Elétrica), a eficiência mínima necessária para o funcionamento dos grupos geradores é de 60%, porque são necessários esses 60% para os grupos fazerem funcionar o circuito de pré-aquecimento do Fuel que os alimenta.

Segundo o Engenheiro Aldino Cruz (Docente da Universidade do Mindelo na disciplina de Produção, Distribuição e Transporte de Energia Elétrica), os grupos geradores em geral trabalham a 75% da sua eficiência por questões de segurança, preservação e gestão do desgaste dos mesmos.

Então esses 75% da Potência Disponível ($17\ 600 \times 0,75$) equivalem a 13 200 kW.

Na ilha de São Vicente já se registaram em dias ventosos, taxas de penetração de energia eólica na rede elétrica que rondam os 50%, isso implica que os grupos geradores trabalharam com 50% da sua potência, correspondentes a 6 600 kW ($13\ 200 \times 0.5$).

Como se pode verificar, a contribuição de 6850 kW dos parques eólicos, atualmente em funcionamento, é maior do que os 6600 kW (50% da disponibilidade de potência da central elétrica).

3.3.1- Enquadramento do Projeto no Panorama energético da Ilha

A previsão feita pela ELECTRA acerca do crescimento da carga para a ilha de São Vicente indica um aumento de 7% a cada ano. Devido a contribuição da energia eólica ser por vezes, em dias de ótimo regime de vento, superior a 50% da potência disponível dos grupos geradores, dividiu-se este projeto em três fases para que respeitasse requisitos de sustentabilidade energética conforme a evolução da demanda na ilha de São Vicente.

Crescimento da Energia(MWh)

	Ano 1 previsão 2019	Ano 2 previsão 2020	Ano 3 previsão 2021	Ano 4 previsão 2022	Ano 5 previsão 2023	Ano 6 previsão 2024
S. VICENTE	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%
Vendas de energia	62.235	66.591	71.253	76.240	81.577	87.287

Tabela 5- Previsão do Crescimento da Carga para São Vicente

Durante a execução de cada fase do Projeto serão utilizados equipamentos do mesmo fabricante de forma a garantir uma certa estabilidade nos planos de Manutenção e nos contactos para encomenda de peças.

3.3.2- Ficha Técnica do Aerogerador a ser instalado

Dados Gerais

Fabricante: Enercon (Alemanha)

Modelo: E-33/330

Potência: 330 kW

Frequência: 50 Hz

Diâmetro do Rotor: 33,4 m

Área Varrida: 877 m²

Número de Pás: 3

Sistema de Controlo: Pitch

Gerador

Tipo: SYNC

Número: 1

Velocidade Máxima: 39 rpm

Voltagem: 400 V

Fabricante: Enercon

Rotor

Velocidade Mínima do Rotor: 18 rpm

Velocidade Máxima do Rotor: 39 rpm

Velocidade do Vento no arranque: 2,5 m/s

Velocidade de Cut-Off: 28 m/s

Fabricante: Enercon

Torre

Altura da Torre: 37 m

Fabricante: Enercon

Caixa de Velocidades

Caixa de Velocidades: Sim

Estágios da Caixa de Velocidades: 2

Curva de Potência do Enercon E-33

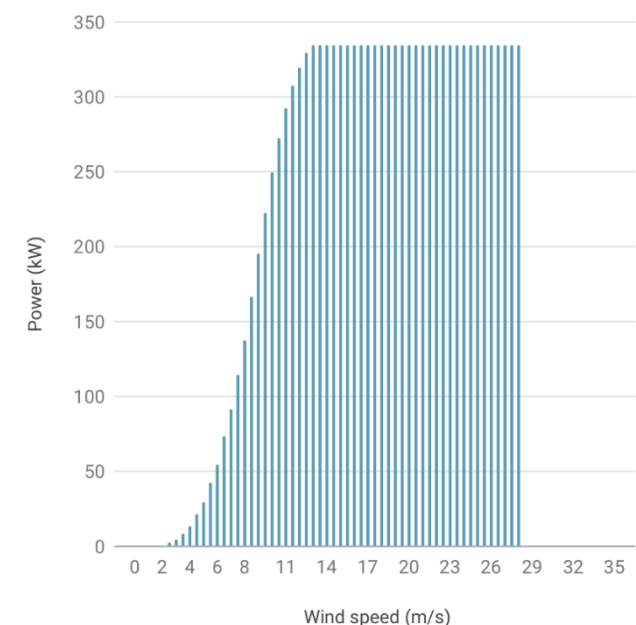


Figura 46- Curva de Potência do Aerogerador Enercon E-33

Month	Wind Speed (m/s)
January	12.140
February	11.675
March	10.475
April	11.804
May	13.008
June	13.119
July	4.745
August	7.229
September	9.270
October	10.893
November	10.250
December	11.469
Annual average:	10.490

Tabela 6- Velocidade Média Anual para a Zona de Ribeira de Vinha

No gráfico do C_p do Enercon E-33 pode-se reparar que tem uma velocidade nominal de aproximadamente 11 m/s, uma velocidade de arranque do gerador de 2,5 m/s e uma velocidade de Cut-Off de 28 m/s. Também pode-se reparar que a Velocidade Média de vento para a Zona de Ribeira de vinha é de aproximadamente 10,5 m/s garantindo assim que o Enercon trabalhe em condições favoráveis ao seu bom desempenho.

Este modelo é claramente melhor aos de duas pás antigamente instalados no mesmo local, pois um só Enercon tem maior potência do que todos os outros 10 Aeromans instalados em 1989.

3.4- Custo do Projeto de Reabilitação do Parque

Os custos associados à instalação de aproveitamentos eólicos dependem fundamentalmente dos custos de instalação e do tipo de tecnologia usada, sendo por isso, muito variáveis em função das fundações, acessos, transporte, ligação à rede, número de turbinas, altura do rotor, tipo de gerador, sistema de controlo... Os dados conhecidos permitem situar o investimento total médio numa gama de variação entre 1000 €/kW e 1500 €/kW (Castro, 2004).

Devido a nossa condição de país insular, os custos da instalação aumentam devido a dificuldade de aquisição, transporte, despesas aduaneiras, equipamentos e técnicos capacitados, daí optar pela escolha do valor de 1500€/kW como custo, que após a aplicação da taxa cambial ($1\text{€} = 111\text{ ECV}$) resulta em 166 500 ECV/kW.

3.4.1- 1ª Fase (330 kW)

Numa primeira fase o projeto foi desenvolvido para a instalação de apenas um aerogerador Enercon E-33, novo, de potência 330 kW conectado a rede elétrica da concessionária ELECTRA.

O parque eólico da Cabeólica é o que mais injeta energia na rede, daí que nos meses mais ventosos a sua carga teria de ser regulada de modo que os três parques possam funcionar em simultâneo sem causar instabilidade na rede elétrica.

Para esse efeito, já nessa fase inicial sugeria-se a criação de um gabinete de despacho na ELECTRA, visto que é ela quem comanda a rede, e este gabinete seria responsável por essa ação de controlo rigoroso das cargas injetadas nesta fase e nas vindouras.

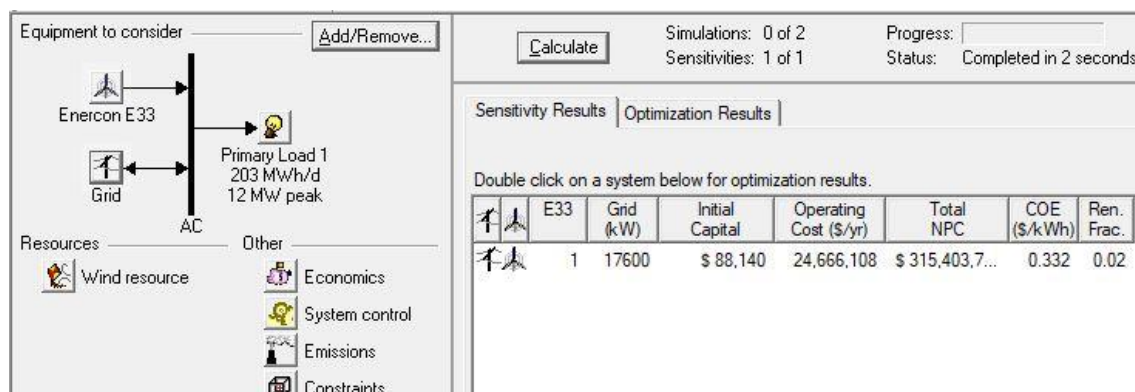


Figura 47- Dimensionamento da 1ª Fase do Projeto

O dimensionamento no Software Homer mostra os valores alcançados para operação do equipamento.

Na figura 47 pode-se verificar que o parque funciona com o Enercon E-33 ligado a rede elétrica que tem uma Potência Disponível de 17 600 kW e que alimenta uma carga de 12 MW de Pico.

Para a potência correspondente a 1ª fase, o custo por kW será: $330\text{kW} \times 166\,500\text{ ECV/kW} = 54\,945\,000 \approx 55\,000\,000\text{ ECV}$.

3.4.2- 2ª Fase (660 kW)

Numa fase intermediária do projeto, será instalado com o objetivo de superar o crescimento da carga, o segundo aerogerador Enercon E-33 330 kW aumentando a potência instalada para 660 kW. A figura abaixo demonstra os valores alcançados para operação do parque com 2 aerogeradores.

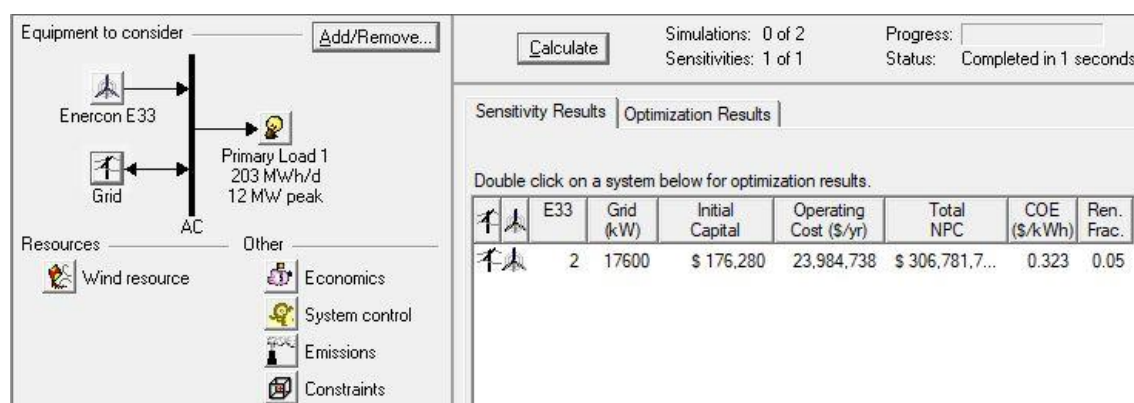


Figura 48- Dimensionamento da 2ª Fase do Projeto

Para aumentar a potência do Parque Eólico para os 660 kW, adiciona-se uma nova instalação de 330 kW ao já existente pertencente à 1ª Fase, ou seja, o custo será também aproximadamente 55 000 000 ECV.

Alguns custos, como por exemplo o custo da estrada de acesso ao Parque e da rede elétrica poderão não ser incluídos visto que já existem, mas assume-se este valor de 55 000 000 ECV de modo a garantir que todos os outros custos de instalação sejam considerados.

3.4.3- 3ª Fase (990 kW)

Na fase final, também com o objetivo de superar o crescimento da carga, agora num horizonte maior do que a da 2ª Fase, será instalado um terceiro Enercon E-33 aumentando a potência do Parque para 990 kW.

A figura abaixo demonstra os valores alcançados para operação do parque agora com 3 aerogeradores.

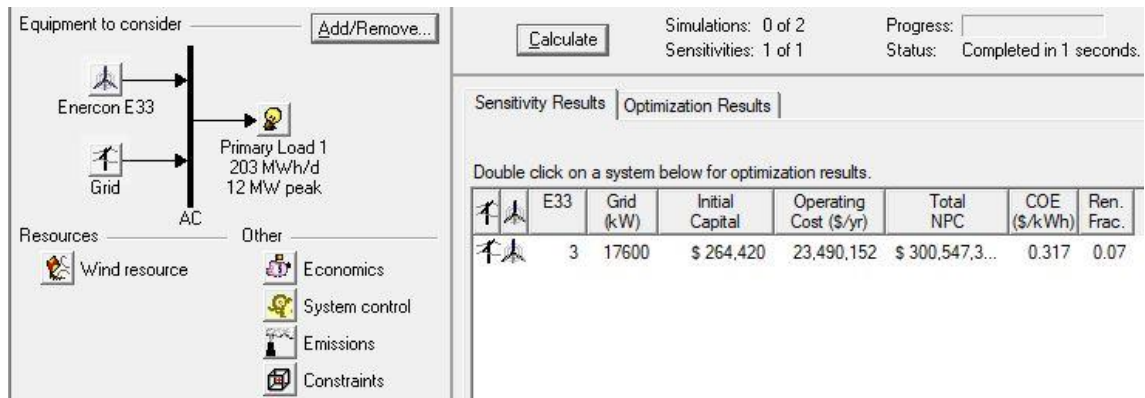


Figura 49- Dimensionamento da 3ª Fase do Projeto

Para aumentar a potência do Parque Eólico para os 990 kW, adiciona-se uma nova instalação de 330 kW aos já existentes pertencentes à 1ª e 2ª Fase, ou seja, o custo será também aproximadamente 55 000 000 ECV.

3.5- Viabilidade Económica Do Projeto da Reabilitação

Para saber qual a viabilidade económica da reabilitação do Parque da Ribeira de Vinha foi estabelecido as tarifas de energia abaixo indicadas:

Rate	Price (\$/kWh)	Sellback (\$/kWh)
Rate 1	0.340	0.080

Tabela 7-Tarifas de Energia do Projeto

Em que 0,34\$/kWh ($0.34 \times 98.7 = 33,5$ ECV/kWh) é o preço da venda de 1kWh de Energia da rede da ELECTRA e os 0,08\$/kWh ($0.08 \times 98,7 \approx 8$ ECV/kWh) é o preço da venda de 1kWh do Parque Eólico da Ribeira de Vinha para a ELECTRA.

3.5.1- 1ª Fase (330 kW)

Quantity	Value	Units
Total rated capacity	330	kW
Mean output	202	kW
Capacity factor	61.2	%
Total production	1,768,865	kWh/yr

Tabela 8-Produção Anual da 1ª Fase do Projeto

Segundo a simulação feita no Homer correspondente à 1ª Fase, o parque produzirá 1 768 865 kWh/ano, mas tendo em conta alguns fatores condicionantes ao seu funcionamento como por exemplo paragens por falhas ou para manutenção e dias com velocidade de vento menor que o cut-in speed do aerogerador, as horas de produção teriam de ser menores. Considerou-se um coeficiente de perdas de 8%, originando assim 1 627 356 kWh/ano. ($1\,768\,865 \times 0,92 = 1\,627\,356$).

O parque terá uma produção anual de 1 627 356 kWh/ano, e como já foi acima referido, terá também na fase inicial um orçamento de 55 000 000 ECV.

Os 1 627 356 kWh/ano cedidos à rede elétrica em termos monetários equivalem a uma quantia de 13 018 848 ECV/ ano ($1\,627\,356 \text{ kWh/ano} \times 8 \text{ ECV/kWh}$).

O Projeto tem um tempo de vida de 25 anos mas para encontrar o Payback dessa primeira fase faz-se:

$$\frac{55\,000\,000 \text{ ECV}}{13\,018\,848 \text{ ECV/Anos}} = 4,2 \text{ Anos}$$

3.5.2- 2ª Fase (660 kW)

Quantity	Value	Units
Total rated capacity	660	kW
Mean output	435	kW
Capacity factor	65.9	%
Total production	3,811,718	kWh/yr

Tabela 9-Produção Anual da 2ª Fase do Projeto

A 2ª Fase será iniciada 5 anos após o funcionamento em pleno da 1ª Fase do Projeto. Em menos de 5 anos já se beneficiará do retorno do investimento feito para a 1ª Fase e talvez não será preciso recorrer a Banca para executar a 2ª Fase.

Tal como na 1ª Fase considera-se o coeficiente de perdas de 8%, originando assim uma produção anual de 3 506 781 kWh/ano ($3\,811\,718 \times 0.92 = 3\,506\,781$).

O parque terá uma produção anual de 3 506 781 kWh/ano, e terá na fase intermediária um orçamento de 55 000 000 ECV.

Os 3 506 781 kWh/ano cedidos à rede elétrica em termos monetários equivalem a uma quantia de 28 054 248 ECV/ ano ($3\,506\,781 \text{ kWh/ano} \times 8 \text{ ECV/kWh}$).

Para encontrar o Payback da segunda fase faz-se:

$$\frac{55\,000\,000 \text{ ECV}}{28\,054\,248 \text{ ECV/Anos}} \approx 2 \text{ Anos}$$

3.5.3- 3ª Fase (990 kW)

Quantity	Value	Units
Total rated capacity	990	kW
Mean output	606	kW
Capacity factor	61.2	%
Total production	5,305,178	kWh/yr

Tabela 10- Produção Anual da 3ª Fase do Projeto

Esta 3ª Fase terá arranque 3 anos após a instalação da 2ª Fase do projeto.

Aplicando o Coeficiente de 8% como nas fases anteriores, a produção anual na 3ª fase será de 4 880 764 kWh/ano ($5\,305\,178 \times 0.92$).

O parque terá uma produção anual de 4 880 764 kWh/ano, e terá também na última fase um orçamento de 55 000 000 ECV.

Os 4 880 764 kWh/ano cedidos à rede elétrica em termos monetários equivalem a uma quantia de 39 046 112 ECV/ ano (4 880 764 kWh/ano x 8 ECV/kWh).

Para encontrar o Payback da terceira fase faz-se:

$$\frac{55\,000\,000\,ECV}{39\,046\,112\,ECV/Anos} = 1,4\,Anos$$

3.6- Poupança de Combustíveis Fósseis após implementação do Projeto

A ELECTRA para fazer funcionar os grupos geradores de energia elétrica, utiliza maioritariamente o Fuel 380 cSt mas em situações excecionais pode utilizar o Fuel 180 cSt ou ainda Gasóleo.

Segundo o relatório de contas da ELECTRA, no ano de 2016 Fuel 380 cSt teve um consumo específico de 211 g/ kWh. Isso significa que para produzir 1 kWh de energia os grupos precisaram consumir 211 g de Fuel.

3.6.1- 1ª Fase (330 kW)

Para se saber qual será a poupança anual de combustível calcula-se a quantidade do mesmo através da produção anual do Parque Eólico relativamente a 1ª fase do Projeto. Segundo o Dimensionamento o parque produzirá 1 627 356 kWh/ano.

Então para encontrar-se a quantidade capaz de gerar 1 627 356 kWh faz-se:

$$\begin{array}{ccc} 211 \text{ g Fuel 380} & \text{—————} & 1 \text{ kWh} \\ X & \text{—————} & 1\,627\,356 \text{ kWh/Ano} \end{array}$$

Pela regra de 3 simples:

$$\begin{aligned} X &= \frac{211 \text{ g} \times 1\,627\,356 \text{ kWh/Ano}}{1 \text{ kWh}} \\ X &= 343\,372\,116 \text{ g/Ano} \\ X &\approx 343,372 \text{ Toneladas/Ano} \end{aligned}$$

3.6.2- 2ª Fase (660kW)

Para se saber qual será a poupança anual de combustível relativamente a 2ª fase do Projeto tendo em conta que a produção anual será de 3 506 781 kWh/ano, faz-se:

$$\begin{array}{ccc} 211 \text{ g Fuel 380} & \text{—————} & 1 \text{ kWh} \\ X & \text{—————} & 3\,506\,781 \text{ kWh/Ano} \end{array}$$

Pela regra de 3 simples:

$$\begin{aligned} X &= \frac{211 \text{ g} \times 3\,506\,781 \text{ kWh/Ano}}{1 \text{ kWh}} \\ X &\approx 740 \text{ Toneladas/Ano} \end{aligned}$$

3.6.3- 3ª Fase (990kW)

Para se saber qual será a poupança anual de combustível relativamente a 3ª fase do Projeto tendo em conta que a produção anual será de 4 880 764 kWh/ano, faz-se:

$$\begin{array}{ccc} 211 \text{ g Fuel } 380 & \text{—————} & 1 \text{ kWh} \\ X & \text{—————} & 4\,880\,764 \text{ kWh/Ano} \end{array}$$

Pela regra de 3 simples:

$$X = \frac{211 \text{ g} \times 4\,880\,764 \text{ kWh/Ano}}{1 \text{ kWh}}$$

$$X = 1\,029\,841 \text{ g/Ano}$$

$$X \approx 1030 \text{ Toneladas/Ano}$$

3.7- Poupança em Termos Monetários para os Cofres do Estado

A ELECTRA, sendo uma empresa Estatal, ao fazer a poupança no consumo dos combustíveis fósseis acaba por gerar também uma poupança em termos económicos para o Estado de Cabo Verde. Segundo os preços afixados pela ARE (de 1 a 30 de Junho de 2019) o preço do Fuel 380 cSt equivale a 66,10 ECV/kg.

3.7.1- 1ª Fase (330 kW)

Como foi possível reparar no capítulo referente a poupança de combustível, a 1ª fase do projeto permitirá poupar 343,372 toneladas/Ano (equivalente a 343 372 Kg/Ano) de Fuel 380. Sabendo que o preço deste mesmo é de 66,10 ECV/Kg, para se encontrar a poupança em termos monetários faz-se:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kg} &\text{ ————— } 66,10 \text{ ECV} \\ 343\,372 \text{ Kg/Ano} &\text{ ————— } X \\ X &= \frac{343\,372 \frac{\text{Kg}}{\text{Ano}} \times 66,10 \text{ ECV}}{1 \text{ Kg}} \end{aligned}$$

$$X \approx 22\,700\,000 \text{ ECV/Ano}$$

3.7.2- 2ª Fase (660 kW)

A 2ª fase do projeto permitirá poupar 740 toneladas/Ano (equivalente a 740 000 Kg/Ano) de Fuel 380. Para se encontrar a poupança em termos monetários faz-se:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kg} &\text{ ————— } 66,10 \text{ ECV} \\ 740\,000 \text{ Kg/Ano} &\text{ ————— } X \\ X &= \frac{740\,000 \frac{\text{Kg}}{\text{Ano}} \times 66,10 \text{ ECV}}{1 \text{ Kg}} \end{aligned}$$

$$X \approx 49\,000\,000 \text{ ECV/Ano}$$

3.7.3- 3ª Fase (990 kW)

A 3ª fase do projeto permitirá poupar 1030 toneladas/Ano (equivalente a 1 030 000 Kg/Ano) de Fuel 380. Para se encontrar a poupança em termos monetários faz-se:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kg} &\text{ ————— } 66,10 \text{ ECV} \\ 1\,030\,000 \text{ Kg/Ano} &\text{ ————— } X \\ X &= \frac{1\,030\,000 \frac{\text{Kg}}{\text{Ano}} \times 66,10 \text{ ECV}}{1 \text{ Kg}} \\ X &\approx 68\,100\,000 \text{ ECV/Ano} \end{aligned}$$

A produção de 1 kWh feita por Fuel 380 cSt custa aproximadamente 14 ECV (13,9 ECV) à ELECTRA, daí que a compra de 1 kWh por 8 ECV produzido no Parque Eólico da Ribeira de Vinha apresenta-se como uma alternativa bastante viável. O facto da energia elétrica ser produzida aproveitando uma fonte renovável e abundante faz com que o preço da compra seja constante podendo assim garantir uma certa estabilidade no preço da eletricidade cedida pelo Parque, o que já não acontece quando se baseia em combustíveis fósseis visto que, o mercado fóssil está em constante oscilação de preço.

O Estado ao adquirir eletricidade cedida pelo Parque Eólico da Ribeira de Vinha à um valor menos dispendioso e com as economias que o funcionamento do mesmo dirige para os seus cofres, terá em mãos, junto com as entidades reguladoras, mais uma solução para a redução em parte das tarifas domésticas de energia.

3.8- Impactes Ambientais do Projeto da Reabilitação

De acordo com alínea a) do nº 2 do artigo 1º do Decreto-Lei nº 29/2006 de 6 de Março de 2006, Centrais de produção de energia (eólica, das ondas, geotérmica) devem ser submetidos ao processo de AIA⁸.

Embora este projeto seja uma forma de produção sustentável de eletricidade, livre da emissão de GEE, ainda assim existem alguns impactes a serem levados em conta. De realçar também que é indispensável que o projeto seja adequadamente adaptado na paisagem e que esteja em colaboração com a comunidade local, para manter o apoio da opinião pública a esta forma de energia. Os possíveis impactes podem ser:

- **Impacte Visual:** O impacte visual das turbinas é uma questão de gosto pessoal, ou seja, há quem considere que as turbinas se integram harmoniosamente na paisagem e quem considere a sua presença incomodativa. Portanto este impacte é bastante relativo variando de pessoa para pessoa.
- **Ruído produzido pelos Aerogeradores:** o ruído mecânico (associado à caixa de velocidades, gerador e motores auxiliares) e o ruído aerodinâmico (relacionado com o movimento das pás no ar) são praticamente inevitáveis principalmente a baixas velocidades de vento, pois a altas velocidades o ruído do vento sobrepõe os dos equipamentos. Mas com a inexistência de habitações nas imediações do Parque, os ruídos por ele causado não provocarão incómodos.
- **Uso da Terra:** o uso da terra não fica comprometido com a instalação do Parque eólico, uma vez que apenas uma pequena percentagem do espaço onde é instalado o parque eólico fica efetivamente ocupado.
- **Ecologia:** o Parque não afeta de forma considerável nem a Flora nem a Fauna do local em questão garantindo assim que a sua operação esteja em conformidade com o Meio Ambiente.

⁸ Instrumento para recolha e reunião de dados e processo de identificação e previsão dos efeitos ambientais de determinados investimentos.

IV- CONCLUSÃO

4.1- Considerações Finais

Dividido em três fases o projeto permitiu o surgimento de uma alternativa sustentável para a produção de energia elétrica e capaz de evoluir consoante o crescimento da demanda da Ilha de São Vicente.

A substituição pelos novos equipamentos de maior porte faz com que o Parque disponha três vezes mais a potência que alcançava antigamente (uma diferença de 300 kW para 900 kW), garantindo assim também o aumento da potência disponível da ilha de 17 600 para 18 500 kW.

O desenvolvimento do projeto teve como resultado final o dimensionamento da Reabilitação do Parque eólico da Ribeira de Vinha que mostrou ser um sistema prático e viável com um Payback bastante agradável.

Para a execução do Projeto sugeriu-se a criação de um gabinete de despacho na ELECTRA, pois é esta empresa quem gere a rede, e este gabinete seria responsável por essa ação de controlo rigoroso das cargas injetadas na primeira fase e nas outras vindouras.

Sendo Cabo Verde um país fortemente dependente da importação de combustíveis fósseis para alimentar a maioria do seu setor energético, o avanço deste projeto constitui uma possibilidade de geração de energia elétrica com menos custos para o Estado de acordo com os cálculos anteriormente apresentados.

O projeto demonstrando agir de forma não impactante para o Ambiente e apresentando valores consideráveis de poupança para o Estado de Cabo Verde reuniu assim condições favoráveis ao seu avanço futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Batista, N. (2003). “*Novo Aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano*”, Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- [2] Castro, R. (2004). “*Introdução a Energia Eólica*”, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [3] Custódio, R.S. (2002). “*Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul.*” Rio Grande do Sul, Brasil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul PUCRS Fac. de Engenharia.
- [4] Dutra, R. (2008). “*Energia Eólica Princípios e Tecnologias*”, CRESESB, Salvo Brito, Brasil.
- [5] Hansen, M. (2008) “*Aerodynamics of Wind Turbines*”. Earthscan, Reino Unido.
- [6] Hassan, U. Sykes, D.M. (1990) “*Wind Structure and Statistics*”, Capítulo 2 do livro “*Wind Energy Conversion Systems*”. Reino Unido, editado por Freris, L.L., Prentice Hall International.
- [7] Hemami, A. (2012). “*Wind Turbines Technology*”, IA, USA.
- [8] Irena. (2016). “*A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands, 3rd Edition.*” Abu Dhabi.
- [9] Lopes, J. V. (2002). “*Bissau, Guiné-Bissau: Revistas dos estudos Guineenses.*” Cabo Verde.
- [10] Marçal, D. (2012). “*Estudo numérico de uma pequena turbina eólica de rotor tipo H*”, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [11] Martins, F.R. Guarnieri, R.A. e Pereira, E.B. (2007). “*O aproveitamento da energia eólica*” São José dos Campos, SP, Brasil, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos.
- [12] Monteiro, A. (2018). “*Atlas do Potencial Eólico para o Arquipélago de Cabo Verde.*”, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [13] Montezano, B.E.M., (2007). “*Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML.*” UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Departamento de Engenharia Elétrica.

- [14] Pavinatto, E. (2005). *“Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [15] Rocha, C. (2017). *“Fabricação de um protótipo de Aerogerador de Savonius por impressão 3D”*, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [16] Silva, G. (2011). *“Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical”*, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [17] Vitorino, C. (2012). *“Modelagem dinâmica de caixa Multiplicadora de velocidades de aerogeradores”*, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

ANEXOS

Anexo 1: Dados Gerais do Dimensionamento

Carga

Choose a load type (AC or DC), enter 24 hourly values in the load table, and enter a scaled annual average. Each of the 24 values in the load table is the average electric demand for a single hour of the day. HOMER replicates this profile throughout the year unless you define different load profiles for different months or day types. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

LabelPrimary Load 1Load type: ACDCData source: Enter daily profile(s)Import time series data fileImport File...

Baseline data

MonthJanuaryDay typeWeekday

Hour	Load (kW)
00:00 - 01:00	7,000.000
01:00 - 02:00	7,000.000
02:00 - 03:00	7,000.000
03:00 - 04:00	7,000.000
04:00 - 05:00	7,000.000
05:00 - 06:00	7,000.000
06:00 - 07:00	8,500.000
07:00 - 08:00	9,000.000
08:00 - 09:00	8,000.000
09:00 - 10:00	8,000.000
10:00 - 11:00	8,000.000
11:00 - 12:00	8,000.000

Daily Profile

DMap

Seasonal Profile

Random variability

Day-to-day0 %Time-step-to-time-step0 %

Scaled annual average (kWh/d)203500{.}

	Baseline	Scaled
Average (kWh/d)	203,500	203,500
Average (kW)	8,479	8,479
Peak (kW)	12,000	12,000
Load factor	0.707	0.707

Efficiency Inputs...

Plot...Export...HelpCancelOK

Rede Elétrica

Click Add to add as many rates as necessary. Select a rate and click on the diagram to indicate when each rate applies.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

RatesEmissionsAdvancedForecasting

Scheduled ratesReal time prices

Rate schedule

Step 1: Define and select a rate

Rate	Price (\$/kWh)	Sellback (\$/kWh)	Demand (\$/kW/mo)
Rate 1	0.340	0.150	0.000

AddRemoveEdit...

Step 2: Select a time period

All WeekWeekdaysWeekends

Step 3: Click on the chart to indicate when the selected rate applies.

Net metering

Net purchases calculated monthlyNet purchases calculated annually

Rate Schedule

Time of Day

00:0004:0008:0012:0016:0020:0024:00


JanFebMarAprMayJunJulAugSepOctNovDec

Rate 1

All weekWeekdaysWeekends

88

Recurso Eólico

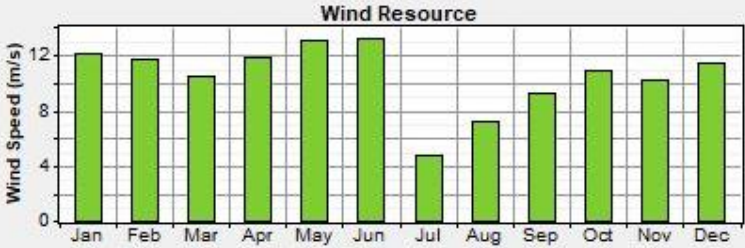
 HOMER uses wind resource inputs to calculate the wind turbine power each hour of the year. Enter the average wind speed for each month. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value. The advanced parameters allow you to control how HOMER generates the 8760 hourly values from the 12 monthly values in the table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source: ☒ Enter monthly averages ☐ Import time series data file

Baseline data

Month	Wind Speed (m/s)
January	12.140
February	11.675
March	10.475
April	11.804
May	13.008
June	13.119
July	4.745
August	7.229
September	9.270
October	10.893
November	10.250
December	11.469
Annual average:	10.490



Other parameters: Altitude (m above sea level) Anemometer height (m)

Advanced parameters: Weibull k Autocorrelation factor Diurnal pattern strength Hour of peak windspeed

Scaled annual average (m/s)

Dados de ventos da Cabeólica para a Zona de Selada de Flamengo referentes à 2013.

Anexo 2: Dados específicos dos Dimensionamentos

1ª Fase (330 kW)

Turbine type:

Turbine properties

Abbreviation: E33 (used for column headings)

Rated power: 330 kW AC

Manufacturer: Enercon

Website: www.enercon.de

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	88140	88140	13200
<input type="text" value="{}"/>	<input type="text" value="{}"/>	<input type="text" value="{}"/>	<input type="text" value="{}"/>

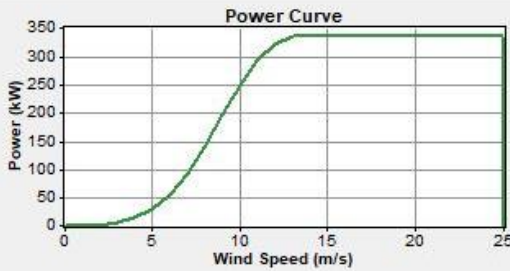
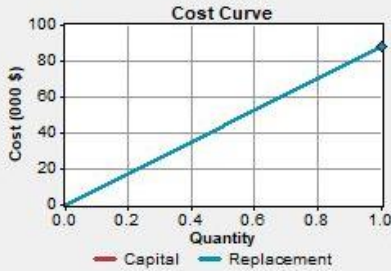
Other

Lifetime (yrs)

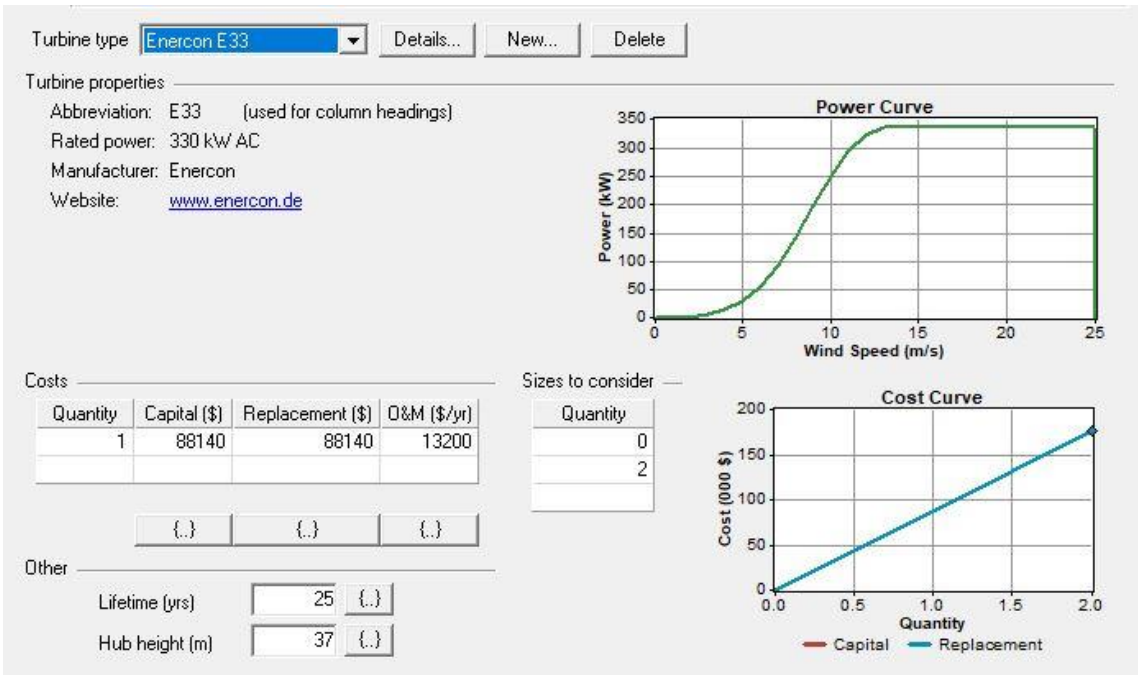
Hub height (m)

Sizes to consider

Quantity
0
1

2ª Fase (660 kW)



3ª Fase (990 kW)

